



**TUGAS AKHIR - TF 141581**

# **PERANCANGAN SISTEM *FAULT TOLERANT CONTROL* PADA TURBIN ANGIN DENGAN KESALAHAN PADA AKTUATOR**

**ALIF HELMI AGHNIA**  
**NRP. 0231134000025**

**Dosen Pembimbing :**  
**Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA**  
**Fakultas Teknologi Industri**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
**Surabaya 2018**

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



***FINAL PROJECT - TF 141581***

***DESIGN OF FAULT TOLERANT CONTROL  
ON WIND TURBINE SYSTEM WITH  
ACTUATOR FAULT***

ALIF HELMI AGHNIA  
NRP. 02311340000025

Supervisors:  
Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T.

***ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2018***

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME**

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Alif Helmi Aghnia  
NRP : 02311340000025  
Departemen/Prodi : Teknik Fisika/S1 Teknik Fisika  
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri  
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "Perancangan Sistem Fault Tolerant Control Pada Turbin Angin Dengan Kesalahan Pada Aktuator" adalah benar karya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada tugas akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 9 Januari 2018  
Yang membuat pernyataan,



Alif Helmi Aghnia  
NRP.02311340000025

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

## Perancangan Sistem *Fault Tolerant Control* Pada Turbin Angin Dengan Kesalahan Pada Aktuator

Oleh :

Alif Helmi Aghnia  
NRP. 02311340000025

Surabaya, 9 Januari 2018

Menyetujui,  
Dosen Pembimbing



Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.  
NIPN. 19760523 200012 2 001

Mengetahui,  
Kepala Departemen  
Teknik Fisika FTI-ITS



Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.  
NIPN. 19780902 200312 1 002

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



**PERANCANGAN SISTEM *FAULT TOLERANT CONTROL*  
PADA TURBIN ANGIN DENGAN KESALAHAN PADA  
AKTUATOR**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**ALIF HELMI AGH Nia**  
**NRP. 02311340000025**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T. .... (Pembimbing I)
2. Hendra Cordova, S.T., M.T. .... (Penguji I)
3. Dr. Ir. Ali Musyafa', MSc ..... (Penguji II)
4. Dr.-Ing. Doty Dewi Risanti, ST, MT ..... (Penguji III)

**SURABAYA  
JANUARI, 2018**

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# **PERANCANGAN SISTEM *FAULT TOLERANT CONTROL* PADA TURBIN ANGIN DENGAN KESALAHAN PADA AKTUATOR**

**Nama** : Alif Helmi Aghnia  
**NRP** : 02311340000025  
**Jurusan** : Teknik Fisika FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T.

## **Abstrak**

Kegagalan sistem turbin angin akibat kesalahan minor pada komponen seperti aktuator dapat berakibat fatal karena seiring waktu berjalan akan menimbulkan kesalahan major yang membuat performansi terus menurun bahkan dapat mengakibatkan turbin angin berhenti beroperasi. Pada tugas akhir ini dilakukan perancangan sistem *Fault Tolerant Control* (FTC) dengan menggunakan *observer* yang mampu bekerja ketika terjadi kesalahan pada aktuator di sistem pengendalian kecepatan generator sehingga performansi sistem dapat terjaga. Langkah pertama yang dilakukan adalah membuat simulator turbin angin. Langkah kedua adalah merancang *observer* untuk mengestimasi kesalahan bias. Dalam hal ini *gain observer* dicari dengan menggunakan metode *pole-placement*. Dari Hasil simulasi diperoleh bahwa kesalahan bias maksimum yang masih bisa diakomodasi oleh sistem tanpa FTC adalah 0,7 pu, sedangkan dengan sistem FTC mampu meng-akomodasi kesalahan bias hingga 1,2 pu meskipun terjadi *maximum undershoot* sebesar 10,8% dan dapat menghasilkan nilai *settling time* yang lebih cepat sebesar 715 detik.

**Kata kunci:** Turbin Angin, *Fault Tolerant control*, Aktuator.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## ***DESIGN OF FAULT TOLERANT CONTROL SYSTEM ON WIND TURBINE WITH ERRORS IN ACTUATOR***

***Name*** : Alif Helmi Aghnia  
***NRP*** : 02311340000025  
***Department*** : Teknik Fisika FTI-ITS  
***Supervisors*** : Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T.

### ***Abstract***

*Failure in wind turbine system due to minor faults that are not dealt with immediately on components such as actuator could be a big problem for the system. It is because the fault will lead to major fault that will decrease the performance of the system and may even cause the wind turbine to stop operating. In this final project, Fault Tolerant Control (FTC) system using by observer that can work when there is a fault on actuator in the generator speed system control, so that system performance can be maintained. The first step is to make simulator of wind turbine. The second step is to design observer to estimate the bias fault. In this case, the gain observer is searched by using pole-placement method. From the result of simulation, showed that the maximum refractive fault that could still be accommodated by the system without FTC was 0,7 pu. Whereas, FTC system could accommodate bias fault up to 1,2 pu, although there was maximum undershoot of 10,8%. for settling time, it could resulting a faster settling time value of 715 seconds.*

***Keywords:*** Wind Turbine, Fault Tolerant control, Actuator

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **KATA PENGANTAR**

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, serta shalawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW, hingga terselesaikannya Tugas Akhir beserta Laporan Tugas Akhir yang berjudul **PERANCANGAN SISTEM *FAULT TOLERANT CONTROL* PADA TURBIN ANGIN DENGAN KESALAHAN PADA AKTUATOR.**

Penulis telah banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian Tugas Akhir dan laporan Tugas Akhir ini. Penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T, M.Si., Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Fisika yang telah memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan selama menempuh pendidikan di Teknik Fisika.
2. Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T. selaku dosen pembimbing yang telah dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan yang sangat bermanfaat.
3. Bapak Totok Ruki Biyanto S.T., M.T., Ph.D. selaku Kepala Laboratorium Rekayasa Instrumensi yang telah memberikan ilmu, petunjuk, nasihat, serta kemudahan perizinan.
4. Ibu Dyah Sawitri, S.T, M.T. selaku dosen wali penulis.
5. Kedua orang tua serta keluarga Terimakasih atas segala cinta, kasih sayang, doa, perhatian, serta dukungan moril dan materiil yang telah diberikan.
6. Seluruh teman Tugas Akhir (Tulus Indra, Diyajeng Luluk, Amalia Zabda, Adhitya Dwi, Maya Aulia dan Dikky Julistian), terima kasih untuk semuanya.
7. Seluruh dosen, karyawan dan civitas akademik Teknik Fisika, terimakasih atas segala bantuan dan kerjasamanya.
8. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih atas bantuannya.

Penulis sadar bahwa penulisan laporan Tugas Akhir ini tidaklah sempurna, namun semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi yang berarti dan menambah wawasan yang bermanfaat

bagi pembaca, keluarga besar Teknik Fisika khususnya, dan civitas akademik ITS pada umumnya. Selain itu juga semoga dapat bermanfaat sebagai referensi pengerjaan laporan Tugas Akhir bagi mahasiswa yang lain.

Surabaya, 9 Januari 2018

Penulis



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
COVER PAGE .....	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME .....	v
LEMBAR PENGESAHAN I .....	vii
LEMBAR PENGESAHAN II .....	ix
ABSTRAK .....	xi
ABSTRACT .....	xiii
KATA PENGANTAR .....	xv
DAFTAR ISI .....	xvii
DAFTAR GAMBAR .....	xix
DAFTAR TABEL .....	xxi
DAFTAR NOTASI .....	xxiii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	3
1.3. Tujuan .....	3
1.4. Batasan Masalah .....	3
1.5. Sistematika Laporan .....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.1 Turbin Angin .....	5
2.2 Jenis-Jenis Turbin Angin .....	6
2.2.1 Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) .....	6
2.2.2 Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) .....	7
2.3 Komponen Turbin Angin .....	8
2.4 Konverter AC/AC .....	11
2.5 Sistem Kendali PI .....	13
2.6 Pemodelan Dinamik dari Turbin Angin .....	14
2.7 Fault Tolerant Control (FTC) .....	18
2.8 Observer .....	20
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....	25
3.1 Penentuan Spesifikasi Turbin Angin .....	26
3.2 Pembuatan Model Turbin Angin .....	26
3.3 Perancangan State Space Observer .....	30
3.4 Pembuatan Algoritma Kompensasi .....	36

3.5	Pengujian Sistem FTC .....	37
BAB IV ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN.....		39
4.1	Uji Observer .....	39
4.2	Uji Performansi.....	40
4.2.1.	Uji Kesalahan Bias 0.3 pu.....	40
4.2.2.	Uji Kesalahan Bias 0.6 pu.....	42
4.2.3.	Uji Kesalahan Bias 0.9 pu.....	44
4.2.4.	Uji Kesalahan Bias 1.2 pu.....	46
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....		49
5.1	Kesimpulan.....	49
DAFTAR PUSTAKA		
LAMPIRAN		
BIODATA PENULIS		

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b>	Modern utility-scale wind turbine .....	5
<b>Gambar 2. 2</b>	Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) .....	7
<b>Gambar 2. 3</b>	Vertical Axis Wind Turbine (VAWT).....	8
<b>Gambar 2. 4</b>	Komponen - komponen turbin angin.....	8
<b>Gambar 2. 5</b>	Configuration of PSMG wind energy conversion system using CSC .....	12
<b>Gambar 2. 6</b>	Diagram blok sistem pengendalian tertutup .....	13
<b>Gambar 2. 7</b>	Variasi dari $C_p$ dari Tip Speed Ratio.....	17
<b>Gambar 2. 8</b>	Skema Active Fault Tolerant Control.....	19
<b>Gambar 2. 9</b>	Struktur Extended State Observer .....	24
<b>Gambar 3. 1</b>	Diagram alir simulasi wind turbine .....	25
<b>Gambar 3. 2</b>	Mekanisme Kompensasi .....	37
<b>Gambar 4. 1</b>	Hasil Uji Observer .....	39
<b>Gambar 4. 2</b>	Nilai keluaran daya sebelum dan sesudah .....	41
<b>Gambar 4. 3</b>	Nilai uji bias 0.3 pu sebelum sesudah dikompensasi .....	42
<b>Gambar 4. 4</b>	Nilai keluaran daya sebelum dan sesudah dikompensasi dengan kesalahan bias 0.6 pu.....	43
<b>Gambar 4. 5</b>	Nilai uji bias 0.6 pu sebelum dan sesudah dikompensasi .....	44
<b>Gambar 4. 6</b>	Nilai keluaran daya sebelum dan sesudah dikompensasi dengan kesalahan bias 0.9 pu.....	45
<b>Gambar 4. 7</b>	Nilai uji bias 0.9 pu sebelum dan sesudah.....	46
<b>Gambar 4. 8</b>	Nilai keluaran daya sebelum dan sesudah dikompensasi dengan kesalahan bias 1.2 pu.....	47
<b>Gambar 4. 9</b>	Nilai uji bias 1.2 pu sebelum dikompensasi .....	48

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3. 1</b>	Spesifikasi turbin angin .....	26
<b>Tabel 3. 2</b>	Plant Model Parameter .....	37
<b>Tabel 4. 1</b>	Performansi sistem dengan kesalahan bias 0.3 pu pada aktuator.....	41
<b>Tabel 4. 2</b>	Performansi sistem dengan kesalahan bias 0.6 pu pada aktuator.....	43
<b>Tabel 4. 3</b>	Performansi sistem dengan kesalahan bias 0.9 pu pada aktuator.....	45
<b>Tabel 4. 4</b>	Performansi sistem dengan kesalahan bias 1.2 pu pada aktuator.....	47

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR NOTASI

$P_{cap}$	=	Daya aerodinamis yang dihasilkan oleh rotor (watt)
$\rho$	=	Densitas udara (kg/m <sup>3</sup> )
$R$	=	Jari-jari dari rotor (m)
$\beta$	=	Pitch angle dari blade (°)
$\lambda$	=	Tip speed ratio
$V_w$	=	Kecepatan angin efektif yang sesuai dengan rotor (m/s)
$C_p$	=	Koefisien daya yang tergantung $\beta$ dan $\lambda$
$\omega_r$	=	Kecepatan rotor (rpm)
$b_r$	=	Eksternal damping rotor
$J_r$	=	Inersia rotor
$T_a$	=	Torsi aerodinamik turbin angin (Nm)
$C_q$	=	Koefisien torsi
$T_m$	=	Torsi mekanik rotor (Nm)
$J_g$	=	Inersia generator
$b_g$	=	Koefisien gesekan yang merugikan rotor
$T_g$	=	Torsi generator (Nm)
$n$	=	Faktor pengali generator
$\omega_g$	=	Kecepatan generator (rpm)
$A$	=	Matriks keadaan ( <i>state</i> )
$B$	=	Matriks kendali
$C$	=	Matriks keluaran
$D$	=	Matriks gangguan
$u(t)$	=	Masukan kendali (control input)
$\dot{x}(t)$	=	Turunan vektor keadaan
$x(t)$	=	Vektor keadaan
$y(t)$	=	Vektor keluaran
$F_a$	=	Matriks kesalahan aktuator
$f_a$	=	Vektor kesalahan aktuator
$L$	=	<i>Gain</i> matriks <i>observer</i>
$K_p$	=	<i>gain</i> proporsional
$\tau_i$	=	konstanta waktu integral
$T_s$	=	Waktu cuplik

$C_i$	=	koefisien ke - i
$H_{WT}$	=	Konstanta inersia <i>wind turbine(s)</i>
$K_{sh}$	=	Konstanta pegas pada rotor
$D_{mutual}$	=	Konstanta redaman pada motor
$u_m$	=	nilai sinyal kendali yang mengandung kesalahan
$u$	=	nilai kendali sinyal sebenarnya
$\hat{f}_a$	=	estimasi kesalahan aktuator



## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1. Latar Belakang**

Energi berdasarkan ilmu fisika adalah kemampuan untuk melakukan usaha. Energi merupakan suatu kebutuhan primer bagi makhluk hidup, terutama bagi kehidupan manusia. Sumber energi sendiri dibagi dalam 2 bagian, yaitu sumber energi tak terbarukan dan sumber energi alternatif (sumber energi terbarukan). Sumber energi tak terbarukan adalah sumber energi yang tidak dapat dibuat kembali oleh alam dalam keadaan waktu yang sangat singkat. Sumber energi tak terbarukan ini mencakup minyak bumi dan batubara. Sumber energi alternatif (sumber energi terbarukan) adalah sumber energi yang dapat dibuat kembali oleh alam dengan waktu yang singkat, dimana biasa disebut sebagai sumber energi terbarukan. Sumber energi terbarukan ini mencakup matahari, angin, air dan biomassa (Resmi, 2010).

Angin adalah udara yang bergerak dari daerah bertekanan udara tinggi ke daerah yang bertekanan udara lebih rendah. Pergerakan udara ini disebabkan oleh rotasi bumi dan juga karena adanya perbedaan tekanan udara di sekitarnya. Angin merupakan suatu energi yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan suatu energi mekanik, diantara pemanfaatan energi tersebut terdapat pada turbin angin. Angin tersebut menggerakkan turbin angin untuk menghasilkan energi mekanik menjadi energi putar pada kincir yang kemudian energi putar tersebut diubah atau diolah kembali menjadi energi listrik.

Turbin angin merupakan pembangkitan energi listrik yang merubah energi angin untuk menghasilkan energi listrik. Kelebihan dari turbin angin ini merupakan pembangkit listrik terbarukan sehingga tidak menggunakan minyak atau gas alam dan merupakan pembangkit listrik yang ramah lingkungan. Turbin angin terdiri dari 2 jenis yaitu turbin angin sumbu horizontal dan turbin angin sumbu vertikal. Kedua jenis turbin angin ini mempunyai perbedaan, pada jenis turbin horisontal ini harus terletak searah dengan arah angin agar mendapatkan gaya dorong

untuk memutar turbin. Sedangkan turbin angin jenis vertikal dapat dikondisikan dengan berbagai arah angin untuk memutar turbin angin tersebut. Pada umumnya, turbin angin yang sering dipakai adalah jenis turbin angin horisontal dengan tujuan agar mendapatkan efisiensi yang tinggi, akan tetapi turbin angin ini hanya dapat memanfaatkan energi angin yang datang nya searah.

Turbin angin dalam skala besar digunakan di berbagai macam tempat, sebagai contoh pemasangan SKEA (sistem konversi energi angin) pada ladang tertentu pada sebuah desa untuk memenuhi kebutuhan penerangan dan lain-lain yang membutuhkan listrik. Hal ini dilakukan terus menerus dalam jangka waktu panjang selama angin berhembus dan beroperasi secara normal dari turbin angin. Namun seiring berjalannya waktu, maka akan timbul sebuah kesalahan kecil (*minor*) maupun kesalahan besar (*major*) dalam turbin angin tersebut. Jika penanggulangan pada kesalahan kecil (*minor*) dilakukan secara tepat, maka kesalahan besar (*major*) akan jarang terjadi. Salah satu kesalahan *minor* dalam turbin angin adalah kesalahan aktuator. Untuk mengatasi kesalahan ini, maka diperlukan suatu metode agar kesalahan tersebut dapat diatasi. Metode ini adalah *fault tolerant control* (FTC). Metode FTC ini mampu meminimalkan biaya perawatan.

FTC adalah sistem kontrol yang dapat menoleransi kesalahan pada sistem agar sistem dapat terus beroperasi dengan benar saat ada kesalahan (satu atau lebih kesalahan) pada beberapa komponennya (Youmin Zhang & Jin Jiang, 2008). Sebelumnya telah dilakukan penelitian perancangan sistem FTC pada turbin angin dengan kesalahan pada sensor dan aktuator oleh Shaker, dkk (2012). Peneletian ini menggunakan skema *fault tolerant tracking control* (FTTC) untuk sistem nonlinear melalui pendekatan model fuzzy T-S. FTC dengan metode lain diajukan oleh Ghazie (2017). Penelitian yang diajukan adalah perancangan sistem FTC pada turbin angin dengan kesalahan pada sensor. Peneliti melakukan perancangan sistem FTC dengan berbasis *observer* dan menggunakan tehnik *reconfigurable control*. *Observer* digunakan untuk mengestimasi dan mengkompensasi kesalahan yang terjadi pada sensor. Untuk melengkapi penelitian tersebut, maka pada

tugas akhir ini dilakukan perancangan sistem FTC pada turbin angin dengan kesalahan pada aktuator.

## 1.2. Rumusan Masalah

Masalah penelitian yang ingin diangkat dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- a. Bagaimana mendesain *observer* yang dapat mengestimasi kesalahan minor pada aktuator dengan benar?
- b. Bagaimana merancang sistem *fault tolerant control* untuk mengatasi kesalahan aktuator pada turbin angin berbasis *observer*?

## 1.3. Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang ada maka tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah merancang dan mensimulasikan FTC (*Fault Tolerant Control*) untuk mengatasi kesalahan minor pada aktuator agar turbin angin tetap bekerja dengan baik.

## 1.4. Batasan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah maka batasan masalah dari tugas akhir ini adalah :

- a. Variabel yang dikendalikan adalah kecepatan generator.
- b. Variabel yang dimanipulasi adalah torsi generator dan sudut *pitch* bilah.
- c. Komponen aktuator untuk torsi generator adalah konverter AC-AC. Dengan kesalahan bias berupa kesalahan minor.
- d. Komponen aktuator untuk sudut *pitch* bilah adalah motor, dengan diasumsikan tidak terjadi kesalahan
- e. Kecepatan angin yang disimulasikan hanya pada satu nilai.
- f. Obyek yang diteliti adalah *Horizontal Axis Wind Turbine* berskala 400 watt.

## 1.5. Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir adalah sebagai berikut:

**BAB I Pendahuluan**

Bab I ini terdiri dari latar belakang, perumusan masalah, tujuan, batasan masalah dan sistematika laporan.

**BAB II Teori Penunjang**

Bab II ini dibahas mengenai teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan, seperti model turbin angin dan sistem kendali *fault tolerant control* (FTC).

**BAB III Metodologi Penelitian**

Bab ini berisi mengenai rancangan dari penelitian yang dilakukan, metode, dan langkah-langkah dalam penelitian.

**BAB IV Analisis Data dan Pembahasan**

Bab ini berisi tentang data hasil penelitian dari simulasi sistem kendali *pitch blade wind turbine* menggunakan kendali optimal *Fault Tolerant Control* (FTC) untuk menoleransi sebuah kesalahan minor yang terjadi pada actuator.

**BAB V Kesimpulan dan Saran**

Bab ini diberikan kesimpulan tentang tugas akhir yang telah dilakukan berdasarkan data-data yang diperoleh, serta diberikan saran sebagai penunjang maupun pengembangan tugas akhir selanjutnya.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Turbin Angin**

Turbin angin adalah sebuah mesin yang terdiri dari kincir angin dan generator turbin angin. Pada kincir angin, energi angin dikonversi menjadi energi mekanik. Kemudian pada generator angin, energi mekanik yang dihasilkan kincir angin dikonversi menjadi energi listrik. Maka pengertian turbin angin secara umum adalah mesin yang memanfaatkan energi angin untuk menghasilkan listrik. Sebagai penghasil listrik, generator turbin angin terhubung ke beberapa jaringan listrik. Jaringan ini termasuk sirkuit pengisian baterai, sistem tenaga skala perumahan, penggunaan listrik yang besar dan pada ladang yang luas (seperti gambar 2.1). Jika dilihat dari segi jumlah besar keluaran energi listrik, maka turbin angin yang paling sering ditemukan sebenarnya cukup kecil di skala 10 kW atau kurang. Dalam turbin angin modern, proses konversi yang sebenarnya menggunakan kekuatan dasar gaya aerodinamis untuk menghasilkan torsi yang baik pada poros berputar, sehingga menghasilkan tenaga mesin utama dan kemudian ditransformasi ke listrik dalam generator. (J. F. Manwell & J. G .McGowan, 2009)



**Gambar 2. 1** *Modern utility-scale wind turbine*  
(J. F. Manwell & J. G .McGowan, 2009)

Turbin angin merupakan terobosan baru untuk mengatasi permasalahan yang ada dalam bidang energi. Hal ini disebabkan karena turbin angin merupakan pembangkit yang bersih dan ekonomis. Oleh karena itu, turbin angin banyak diminati oleh banyak negara. Banyaknya peminat pada sistem konversi ini membuat turbin angin mengalami pertumbuhan yang pesat. Seiring berkembangnya zaman, turbin angin pun mengalami perkembangan pula dari turbin angin klasik menjadi turbin angin modern. Hal ini dapat dilihat dari daya yang dihasilkan. Bahkan turbin angin dapat diinstalasi pada daerah yang memiliki kecepatan angin rendah (Musyafa', 2016).

## 2.2 Jenis-Jenis Turbin Angin

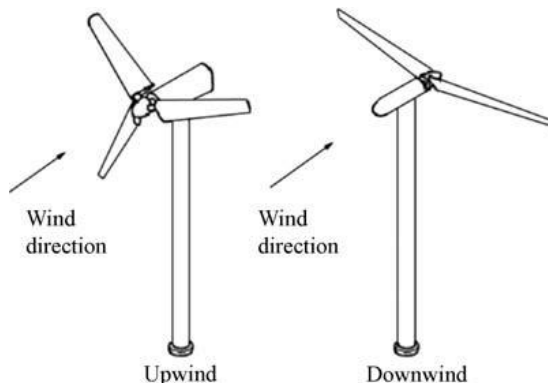
Turbin angin terbagi menjadi dua jenis berdasarkan arah orientasi porosnya, yaitu *horizontal axis wind turbine* (HAWT) dan *vertical axis wind turbine* (VAWT). Kedua tipe turbin angin tersebut memiliki kelebihan masing – masing.

### 2.2.1 Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)

*Horizontal axis wind turbine* (HAWT) atau biasanya disebut juga turbin angin sumbu horizontal (TASH) merupakan turbin angin yang sering digunakan. Turbin angin sumbu horizontal merupakan turbin angin yang sumbu rotasi rotornya paralel (sejajar) terhadap permukaan tanah. Turbin angin sumbu horizontal (TASH) memiliki 2 tipe, *upwind* dan *downwind*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2. *Upwind* adalah TASH dengan *gearbox* yang berada di belakang *blade wind turbine*, sehingga angin yang bertiup langsung mengenai rotor pada *blade* yang tidak menjadi beban berputarnya rotor turbin angin. *Downwind* adalah TASH dengan *gearbox* yang berada di depan *blade wind turbine*. Adanya *gearbox* di posisi itu membuat beban *blade* turbin tidak maksimal dan efisien. Turbin angin sumbu horizontal yang biasa digunakan adalah tipe *upwind*.

Kelebihan TASH yaitu memiliki efisiensi yang tinggi dan *cut-in wind speed* rendah. TASH dioperasikan pada daerah yang memiliki kecepatan angin rendah sampai daerah yang memiliki

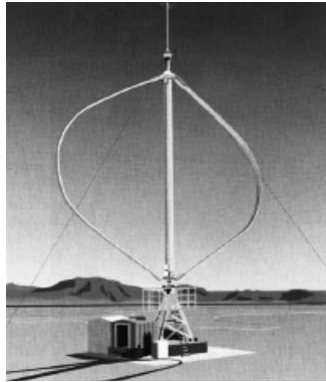
kecepatan angin tinggi. Ukuran turbin dibangun dari skala kecil sampai skala besar. Kekurangannya, yaitu turbin jenis ini memiliki desain yang lebih rumit karena rotor hanya dapat menangkap angin dari satu arah sehingga dibutuhkan pengarah angin, selain itu penempatan dinamo atau generator berada di atas tower sehingga menambah beban tower.



**Gambar 2. 2** *Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)*  
(J. F. Manwell & J. G .McGowan, 2009)

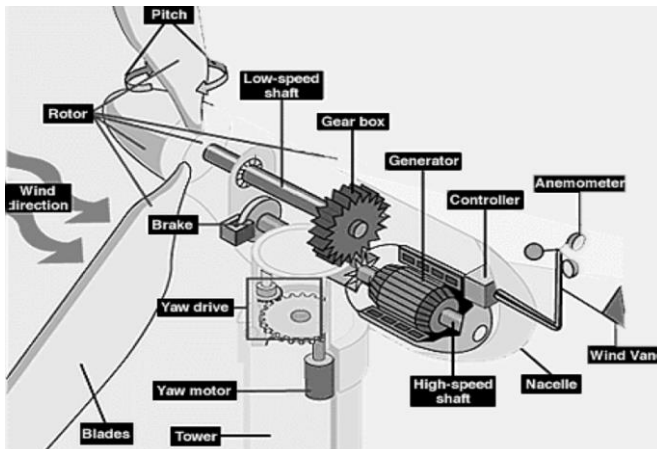
### 2.2.2 Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)

*Vertical axis wind turbine* (VAWT) atau biasa disebut juga turbin angin sumbu vertikal (TASV) merupakan turbin angin yang memiliki gerakan poros dan rotor sejajar dengan arah angin, sehingga rotor dapat berputar pada semua arah angin seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. Kelebihan dari TASV ini adalah memiliki momen gaya yang kuat, sehingga dapat dipakai untuk menggiling biji – bijian dan pompa air. Kekurangan TASV ini adalah sebagian besar tidak cocok apabila dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik, dikarenakan rotornya berputar relatif pelan (dibawah 100 rpm). Sebenarnya dapat dipakai *gearbox* untuk menaikkan kecepatan putarnya, tetapi efisiensinya turun dan mesin sulit untuk dimulai. (Asy'ari, 2012)



**Gambar 2. 3** *Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)*  
(J. F. Manwell & J. G .McGowan, 2009)

## 2.3 Komponen Turbin Angin



**Gambar 2. 4** Komponen - komponen turbin angin  
(Indriawati, dkk. 2017)

Turbin angin terdiri dari rangkaian – rangkaian komponen yang menjadi satu kesatuan sehingga dapat dimanfaatkan sebagai sebuah alat atau mesin untuk mengkonversi energi angin menjadi energi mekanik dan listrik. Berikut penjelasan menurut Manwell



mengenai komponen-komponen turbin angin berdasarkan pada Gambar 2.4:

a. *Blades*

*Blades* adalah bilah atau sering dikenal dengan sebutan baling-baling. *Blades* merupakan komponen dasar yang paling dalam turbin angin, karena *blades* menangkap energi kinetik dari angin yang kemudian dapat menggerakkan rotor pada *hub*. *Hub* adalah komponen yang menghubungkan *blade* ke poros (*shaft*) utama.

b. *Rotor*

*Rotor* terdiri dari hub dan bilah turbin angin, *rotor* merupakan suatu kelompok komponen yang tergolong unik. Karena *rotor* dirancang untuk mengubah kekuatan angin menjadi gerakan putar.

c. *Pitch*

*Pitch* (nada) adalah suatu proses berbaliknya *blades* pada suatu sudut tertentu. *Blades* yang berbalik dari angin bertujuan untuk mengontrol kecepatan angin agar kinerja *rotor* tetap terjaga dalam keadaan angin terlalu tinggi atau terlalu rendah.

d. *Brake*

Pada umumnya, sebagian besar turbin angin menggunakan *brake* (rem) mekanik di suatu tempat di *drive train*. Standart desain (Germanischer Lloyd, 1993) memerlukan dua sistem pengereman, yaitu rem aerodinamis dan rem yang terdapat pada *drive train*. Dalam kegunaannya secara umum, rem mekanis mampu menghentikan turbin. Dan kegunaan lainnya, rem mekanis hanya digunakan untuk parkir. Artinya rem membuat roto tidak berputar saat turbin tidak beroperasi

e. *Low-speed shaft*

*Low-speed shaft* (putaran poros rendah) mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik, sehingga memutar poros rotor dengan kecepatan rendah yang disalurkan menuju *gear box*

yang telah terpasang diujung rotor lain untuk memutar *gear box* pada *high-speed shaft*.

f. *Gear box*

*Gear box* adalah kumpulan dari komponen-komponen *gear*. *Gear* adalah elemen yang digunakan dalam mentransfer torsi dari satu poros ke poros lainnya.

g. *Generator*

*Generator* adalah sebuah mesin konversi yang mengubah energi mekanik dari kincir angin menjadi listrik. *Generator* merupakan komponen yang terpenting dalam turbin angin.

h. *Controller*

*Controller* merupakan sistem kontrol yang menghubungkan operasi semua subsistem secara bersama-sama. Artinya terdapat banyak sistem kontrol pada turbin angin yang saling berhubungan satu sama lain. Sebagai contoh sistem kontrol pada *pitch blade*, sistem kontrol pada pengereman, dan lain-lain.

i. *Anemometer*

*Anemometer* adalah sensor pengukur kecepatan angin, kemudian mengirimkan data kecepatan angin ke *controller*.

j. *Wind vane*

*Wind vane* merupakan komponen yang berfungsi sebagai pendeteksi arah angin, dan mengirimkan data pada *controller* agar mengarahkan turbin pada sumber angin yang datang.

k. *Nacelle*

*Nacelle* merupakan rumah perlindungan dari cuaca untuk komponen turbin angin yang ada didalamnya. Bahan yang biasanya dipakai untuk membuat *nacelle* adalah *fiberglass*. *Nacelle* didesain sesuai dengan ukuran turbin angin, untuk ukuran turbin angin berkapasitas besar biasanya terdapat ruang yang cukup untuk personil memeriksa dan merawat komponen didalamnya.

*l. High-speed shaft*

*High-speed shaft* (putaran poros tinggi) menyalurkan energi mekanik dari *low-speed shaft* untuk diteruskan menuju generator.

*m. Yaw drive*

Dengan beberapa pengecualian, semua turbin angin sumbu horisontal harus mampu menyimpang sehingga dapat menyesuaikan diri sesuai dengan arah angin. Beberapa turbin juga menggunakan *yaw* aktif sebagai cara untuk mengatur daya. Ada dua tipe dasar dari sistem *yaw*, yaitu *yaw* aktif dan *yaw* bebas. Turbin dengan *yaw* aktif biasanya mesin melawan angin. Mereka menggunakan motor untuk aktif menyelaraskan turbin. Turbin dengan *yaw* bebas biasanya mesin mengikuti arah angin. Mereka bergantung pada aerodinamika rotor untuk menyelaraskan turbin. Untuk turbin lebih besar, *yaw* aktif mungkin akan dipertimbangkan lebih dibandingkan turbin yang mengikuti arah angin.

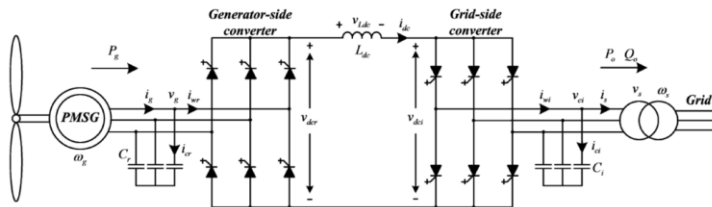
*n. Tower*

*Tower* adalah bagian dari turbin angin yang mendukung untuk meningkatkan bagian utama dari turbin di udara. Sebuah menara biasanya setidaknya setinggi diameter rotor. Untuk turbin kecil menara mungkin jauh lebih tinggi dari itu. Umumnya, ketinggian tower tidak boleh kurang dari 24m karena kecepatan angin lebih rendah dan lebih acak (turbulen) jika terlalu dekat dengan tanah. Menara turbin angin biasanya terbuat dari baja, meskipun beton yang diperkuat kadang-kadang digunakan. Ketika materi adalah baja, biasanya dilakukan galvanisasi atau dicat untuk melindunginya dari korosi. Kadang-kadang digunakan baja Cor-Ten, yang pada dasarnya tahan korosi.

## **2.4 Konverter AC/AC**

Sistem konversi energi angin umumnya menggunakan generator sinkron yang dikendalikan secara langsung (*direct – driven synchronous generator*) dengan konverter daya kapasitas penuh, karena biaya maintenance yang rendah, pemisahan total dengan grid, jangkauan operasi yang lebar dan kemampuan

mengatasi kesalahan. Beberapa topologi konverter yang telah dikembangkan untuk aplikasi energi angin adalah: *voltage source converter* (VSV), *load-commutated inverter* (LCI) dan *current-source converter* (CSC). Dibandingkan dengan VSC dan LCI, CSC menghasilkan fitur yang sederhana dan performansi yang bagus seperti arus sinusoidal dan faktor daya terkontrol penuh (Wu, 2006).



**Gambar 2. 5** Configuration of PMSG wind energy conversion system using CSC

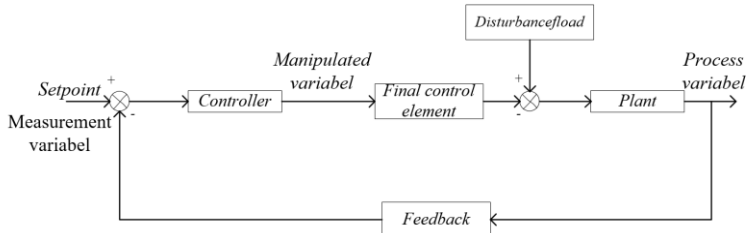
Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5 konfigurasi sistem terdiri atas permanen magnet synchronous generator (PMSG), CSC dan travo yang terhubung dengan grid. Konverter terdiri atas konverter bagian generator, konverter bagian grid dan kapasitor filter pada kedua sisi. Kedua konverter terhubung melalui DC link Choke.

Operasi CSC membutuhkan sumber arus konstan yang dapat dijaga oleh konverter bagian generator atau konverter bagian grid. Secara umum konverter bagian grid mengontrol arus DC link berdasarkan pada asumsi jaringan. Namun, arus DC link aktual ditentukan oleh perbedaan daya pada kedua bagian. Gangguan daya pada output generator, terutama akibat kecepatan angin, tidak ditangani oleh kontrol konverter bagian grid. Hal ini menyebabkan *overshoot* atau *undershoot* yang besar pada respon arus DC link yang selanjutnya dapat mempengaruhi kestabilan sistem. Untuk meningkatkan performansi kontrol arus DC, umpan balik daya dapat digunakan. Dalam hal ini daya *output* generator diukur dan diumpankan ke kontroller arus DC link bagian grid.

Dalam rangka mengestrak energi angin yang lebih besar, diperlukan kemampuan operasi kecepatan yang berubah dan daya yang dibangkitkan bervariasi dalam jangkauan yang lebar. Dengan demikian mempertahankan arus DC *link* tinggi saat input daya rendah menimbulkan rugi-rugi konduksi yang lebih besar sehingga efisiensi sistem berkurang. Oleh karena itu arus DC *link* harus dikontrol pada kondisi minimum.

## 2.5 Sistem Kendali PI

PID (*Proportional-Integral-Derivative*) adalah algoritma sistem pengendali yang banyak digunakan dalam sistem kontrol industri karena dapat mengurangi jumlah parameter yang harus diterapkan. Sistem pengendali merupakan suatu proses mempertahankan variabel yang dikendalikan pada suatu nilai tertentu agar sistem tersebut dapat dalam keadaan stabil. Sistem kendali yang digunakan pada industri pada umumnya sudah menggunakan unit kendali otomatis seperti pada Gambar 2.6.



**Gambar 2. 6** Diagram blok sistem pengendalian tertutup (Basilio, 2002)

Sistem pengendalian PID adalah sistem pengendalian dengan kemampuan menghilangkan respon kesalahan *steady state*, dan menjaga agar output tetap pada keluaran yang diinginkan. Kontrol *proportional* digunakan untuk penguat atau pembesar sinyal sehingga dapat mencapai *setpoint* yang diinginkan. Kontrol *Integral* digunakan untuk menghilangkan *offset* yang dihasilkan dari kontrol *proportional*. Sedangkan kontrol *derivative* digunakan untuk mempercepat respon dalam menghilangkan *offset*.

Sistem pengendali PI merupakan sistem pengendali gabungan dari kontrol *propotional* dan *integral*. Sistem pengendali PI ini berfungsi untuk mencari kestabilan sistem dengan adanya umpan balik (*feedback*) dalam sistem tersebut. Dimana persamaan pengendali PI adalah sebagai berikut:

$$u = K_p e + \frac{1}{K_i} \int e dt \quad (2.1)$$

## 2.6 Pemodelan Dinamik dari Turbin Angin

Menurut (Shaker, 2012), tujuan prinsip dasar dalam operasi sistem turbin angin adalah mengubah energi angin menjadi energi mekanik, kemudian dari mekanik akan digunakan untuk menghasilkan energi listrik. Sistem ini dibuat berdasarkan sistem aerodinamik yang nonlinier dan bergantung pada kekuatan angin yang tidak dapat diatur.

Untuk menerapkan konsep pengendalian ke aplikasi yang nyata, pemodelan matematik yang akurat sangat dibutuhkan untuk turbin angin. Biasanya, model ini diperoleh dengan menggabungkan model subsistem penyusun yang bersama-sama membentuk keseluruhan dinamika turbin angin seperti persamaan (2.2)-(2.13). Salah satu penyusun subsistem adalah daya aerodinamis yang ditunjukkan pada persamaan (2.2).

$$P_{cap} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) V_W^2 \quad (2.2)$$

dengan :

$P_{cap}$  : daya aerodinamis yang dihasilkan oleh rotor (watt)

$\rho$  : densitas udara (kg/m<sup>3</sup>)

$R$  : radius dari rotor (m)

$\beta$  : pitch angle dari blade (°)

$\lambda$  : tip speed ratio

$V_W$  : kecepatan angin efektif yang sesuai dengan rotor (m/s)

$C_p$  : koefisien daya yang tergantung  $\beta$  dan  $\lambda$

Kecepatan rotor dan torsi aerodinamis merupakan input untuk generator. Berikut merupakan persamaan dari torsi aerodinamis ( $T_a$ ) yang berhubungan dengan kecepatan rotor ( $\omega_r$ ) dan daya aerodinamis yang dihasilkan oleh rotor :

$$T_a = \frac{P_{cap}}{\omega_r} \quad (2.3)$$

Dari persamaan (2.2) kemudian disubsitusikan ke dalam persamaan (2.3) yang kemudian menjadi persamaan berikut :

$$T_a = \frac{1}{2\omega_r} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) V_W^3 \quad (2.4)$$

Didefinisikan koefisien torsi,  $C_q$  sebagai berikut:

$$C_q = \frac{C_p}{\lambda} \quad (2.5)$$

Dengan:

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{V_W} \quad (2.6)$$

Sehingga persamaan (2.4) menjadi sebagai berikut:

$$T_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_q(\lambda, \beta) V_W^2 \quad (2.7)$$

Torsi yang bekerja pada rotor merupakan hasil dari torsi aerodinamis turbin angin ( $T_a$ ) dan torsi beban sebagai akibat dari pembebanan ( $T_m$ ) generator dikurangi dengan rugi-rugi akibat gesekan, atau dirumuskan sebagai berikut:

$$J_r \dot{\omega}_r = T_a - T_m - b_r \omega_r \quad (2.8)$$

Dengan:

$b_r$  : eksternal damping rotor

$J_r$  : inersia rotor

Selain rotor yang berperan penting sebagai salah satu komponen turbin angin, generator juga salah satu komponen penting turbin angin. Generator juga merupakan komponen turbin angin yang tidak terhubung secara langsung dengan turbin angin melainkan dengan *gearbox*. Penggunaan *gearbox* ini dikarenakan generator membutuhkan kecepatan putar yang jauh lebih besar dari kecepatan rotor turbin angin, sehingga dibutuhkan faktor pengali agar kecepatan putar generator bisa lebih tinggi. Pengaruh dari *gearbox* dengan faktor pengali  $n$  terhadap persamaan sistem dirumuskan sebagai berikut:

$$T_g = \frac{T_m}{n} \quad (2.9)$$

$$\omega_g = \omega_r n \quad (2.10)$$

Dengan:

$T_g$  : Torsi generator (Nm)

$\omega_g$  : Kecepatan generator (rpm)

$T_m$  : Torsi mekanik rotor (Nm)

$n$  : Faktor pengali

Sehingga model matematis dari percepatan generator menjadi sebagai berikut:

$$J_g \dot{\omega}_g = T_m - T_g - b_g \omega_g \quad (2.11)$$

dengan:

$J_g$  : inersia generator



$b_g$  : eksternal damping generator

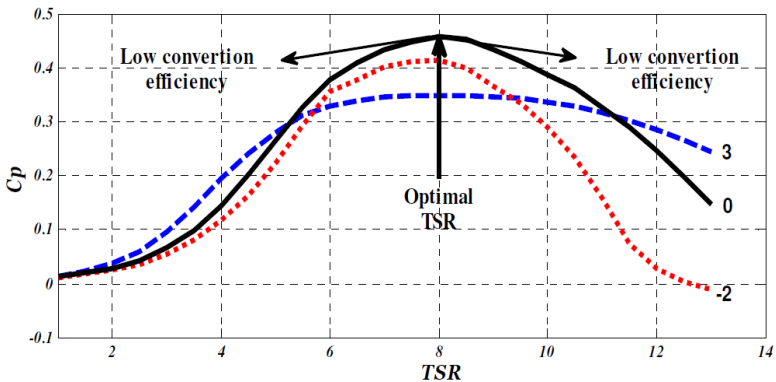
Koefisien daya merupakan satu variabel yang dapat mempengaruhi konversi daya dari turbin angin. Berikut persamaan koefisien daya.

$$C_p = C_1 \left\{ C_6 \cdot \lambda + \left[ -C_4 - C_3 \cdot (2,5 + \beta) + \frac{C_2}{\lambda_i} \right] e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} \right\} \quad (2.12)$$

Dimana:

$$\frac{1}{\lambda + C_7 \cdot (2,5 + \beta)} - \frac{C_8}{1 + (2,5 + \beta)^3} = \frac{1}{\lambda_i} \quad (2.13)$$

$C_p$  merupakan satu variabel yang memiliki nilai bervariasi, salah satunya yaitu terhadap *tip speed ratio* yang akan ditunjukkan seperti pada Gambar 2.7.



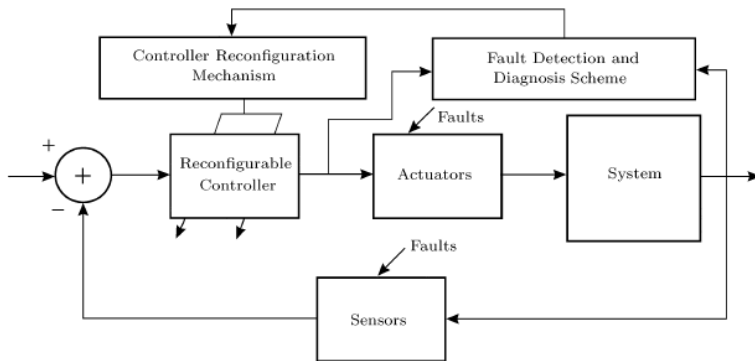
**Gambar 2. 7** Variasi dari  $C_p$  dari Tip Speed Ratio  
(Shaker, 2012)

## 2.7 Fault Tolerant Control (FTC)

Pada umumnya, semua peralatan yang dikontrol secara manual maupun otomatis menggunakan sistem kontrol. Semakin berkembangnya zaman maka semakin berkembang pula alat-alat industri yang canggih, sehingga membutuhkan sistem kontrol yang canggih pula untuk memenuhi persyaratan keselamatan dan kinerja alat industri yang meningkat. Terkadang desain kontrol berbasis umpan balik dapat menurunkan kinerjanya atau bahkan terjadi ketidakstabilan pada suatu sistem. Hal ini terjadi apabila kesalahan kecil yang tidak segera diatasi. Kesalahan biasa terjadi pada aktuator, sensor atau bahkan komponen lainnya yang menyebabkan menurunnya performa kinerja sistem. Untuk mengatasi hal tersebut, telah dikembangkan pendekatan baru untuk mengendalikan sistem. Pendekatan baru ini dilakukan dengan cara menolerir kerusakan komponen sambil mempertahankan stabilitas dan kinerja yang diinginkan. Metode ini sangat bermanfaat jika diaplikasikan dalam sistem keamanan yang kritis, seperti sistem pada pesawat terbang, sistem pengolahan pada pabrik-pabrik industri, dan lain-lain. Konsekuensinya apabila sistem mengalami kesalahan kecil yang tidak ditangani dengan cepat, maka akan menimbulkan kesalahan-kesalahan lainnya yang besar sehingga membuat sistem tidak dapat lagi berjalan. Dalam hal ini diperlukan sistem kontrol yang disebut FTC. (Zhang & Jiang, 2005)

FTC dapat diklasifikasikan pada 2 tipe yaitu *active fault tolerant control system* (AFTCS) dan *passive fault tolerant control system* (PFTCS). AFTC didesain untuk bereaksi terhadap kesalahan dengan cara merekonfigurasi ulang sistem kontrol sehingga apabila terjadi kesalahan, kestabilan dan kinerja dapat kembali terjaga. PFCTS didesain untuk menjadi sistem kontrol yang tahan terhadap kesalahan suatu komponen. Perbedaan AFTC dan PFTC adalah terletak pada cara mengakomodasi kesalahan, yaitu dengan menggunakan *reconfigurable controller* (RC) dan *fault detection and identification* (FDI) atau dengan teknik *robust*. Sehingga kunci utama pada AFTC adalah merancang controller yang dapat direkonfigurasi, skema FDI dengan sensitivitas yang

tinggi terhadap kesalahan dan terhadap ketidakpastian, dan mekanisme rekonfigurasi yang sebisa mungkin mampu memulihkan performansi sistem setelah terjadi kesalahan walaupun terdapat ketidakpastian dan *time delay* pada FDI. Skema untuk AFTCS yaitu pada Gambar 2.8. (Viqi, 2017)



**Gambar 2. 8** Skema Active Fault Tolerant Control  
(Zhang dan Jiang, 2005)

Pada intinya, perancangan sistem yang paling penting dalam AFTC terdiri atas 2 sub sistem yaitu *fault detection and identification* (FDI) dan mekanisme *reconfiguration controller*. FDI berfungsi sebagai pendeteksi jenis kesalahan dan besarnya kesalahan tersebut. Sedangkan rekonfigurasi sinyal control merupakan mekanisme perubahan aksi control untuk menghilangkan kesalahan yang terjadi.

Rekonfigurasi kontrol harus dirancang secara otomatis untuk menjaga stabilitas dan performansi yang diinginkan. Untuk menghindari atau mempertimbangkan akan terjadinya penurunan performansi setelah terjadinya kesalahan, ditambahkan dengan *command governor* untuk menyesuaikan aksi control secara *online*.

## 2.8 Observer

*Observer* adalah sebuah subsistem untuk merekonstruksi vektor state dari plant. Pada dasarnya model matematis dari observer sama dengan model plant, kecuali pada vektor state dari plant terdapat perbedaan antara state awal dengan estimasi output.

Suatu sistem umumnya dimodelkan dalam bentuk *state space*, yang dapat didefinisikan secara umum seperti persamaan sistem dibawah ini, (Ogata, 1997):

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.14)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (2.15)$$

dengan:

A	= Matriks keadaan ( <i>state</i> )
B	= Matriks kendali
C	= Matriks keluaran
D	= Matriks gangguan
$u(t)$	= Masukan kendali (control input) berdimensi m
$y(t)$	= Vektor keluaran atau output berdimensi p
$x(t)$	= Vektor keadaan ( <i>state</i> ) berdimensi n

Model matematis dari *observer* sama seperti model matematis pada sistem yang bertujuan agar *observer* dapat mengestimasi kesalahan pada keadaan sistem dalam bentuk ruang keadaan. Bentuk umum *observer* dengan sebuah kesalahan aktuator dan sensor ditunjukkan pada persamaan (2.16) dan (2.17), dimana persamaan tersebut merupakan representasi dari model matematis pada sistem dengan memodifikasi persamaan (2.14) dan (2.15). modifikasi persamaan tersebut bertujuan agar dapat mengkompensasi kesalahan aktuator, yang telah telah dibentuk oleh (Indriawati, dkk. 2015)

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + F_a f_a(t) \quad (2.16)$$

$$y(t) = C\hat{x}(t) + Du(t) \quad (2.17)$$

dengan :

$F_a$  = matriks kesalahan aktuator

$f_a$  = vector kesalahan aktuator berdimensi q

$\dot{x}(t)$  = Turunan vektor keadaan

Dampak kesalahan aktuator dimodelkan sebagai perubahan sinyal asal tanpa kesalahan  $s(t)$  menjadi sinyal dengan kesalahan  $S_f(t)$  sebagai berikut: (Amarto, 2017)

$$s_f(t) = \alpha s(t) + \beta \quad (2.18)$$

Sehingga kesalahan aktuator adalah

$$f(t) = s_f(t) - s(t) \quad (2.19)$$

Dengan  $\alpha$  dan  $\beta$  adalah konstanta. Penambahan kesalahan  $f(t)$  termasuk  $f_a(t)$  ditunjukkan pada persamaan (2.19).

Didefinisikan variabel baru  $z$  yang merupakan filter output  $y$

$$\dot{z} = y - z \quad (2.20)$$

$$\dot{z} = Cx - z \quad (2.21)$$

Dari persamaan (2.16) dan (2.21) dapat dituliskan persamaan keadaan baru sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}(t) \\ \dot{\hat{z}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} F_a \\ 0 \end{bmatrix} f_a \quad (2.22)$$

Atau

$$\dot{\hat{x}}_a = A_a \hat{x}_a + B_a u + E_a f_a \quad (2.23)$$

Dengan:

$$\mathbf{x}_a = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{z} \end{bmatrix}, \mathbf{A}_a = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ \mathbf{C} & -\mathbf{I} \end{bmatrix}, \mathbf{B}_a = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{E}_a = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_a \\ 0 \end{bmatrix}$$

Sedangkan persamaan output didefinisikan sebagai berikut:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{z} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{C}_a \mathbf{x}_a \quad (2.25)$$

Dengan:

$$\mathbf{C}_a = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{C} \end{bmatrix}$$

Persaman *observer* selanjutnya diturunkan dari persamaan (2.23) yang digambarkan pada Gambar 2.10, yaitu sebagai berikut:

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}_a(t) = \mathbf{A}_a \hat{\mathbf{x}}_a + \mathbf{B}_a \mathbf{u} + \mathbf{E}_a \hat{\mathbf{f}}_a + \mathbf{L}_x (\mathbf{Y} - \hat{\mathbf{Y}}) \quad (2.26)$$

$$\hat{\mathbf{f}}_a = \mathbf{L}_f (\mathbf{Y} - \hat{\mathbf{Y}}) \quad (2.27)$$

$$\hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{C}_a \hat{\mathbf{x}} \quad (2.28)$$

Dengan penulisan  $\hat{\phantom{x}}$  menunjukkan estimasi variabel terkait.  $\mathbf{L}_x$  dan  $\mathbf{L}_f$  adalah gain observer. Selanjutnya persamaan (2.26) dan (2.27) dijadikan satu menjadi persamaan matriks berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\mathbf{x}}}_a \\ \dot{\hat{\mathbf{f}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_a & \mathbf{E}_a \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_a \\ \hat{\mathbf{f}}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_a \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{u} + \begin{bmatrix} \mathbf{L}_x \\ \mathbf{L}_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{C}_a & 0 \end{bmatrix} (\mathbf{Y} - \hat{\mathbf{Y}}) \quad (2.29)$$

$$\dot{\hat{\tilde{x}}} = \tilde{A}\hat{\tilde{x}} + \tilde{B}u + L\tilde{C}(Y - \hat{Y}) \quad (2.30)$$

Dengan:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} A_a & E_a \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \tilde{B} = \begin{bmatrix} B_a \\ 0 \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} L_x \\ L_f \end{bmatrix}, \tilde{C} = [C_a \quad 0]$$

Persamaan dinamik *error observer* selanjutnya diturunkan dari (2.30), yaitu:

$$\dot{e} = (\tilde{A} - L\tilde{C})e \quad (2.31)$$

Dimana:

$$e = \tilde{x} - \hat{\tilde{x}}$$

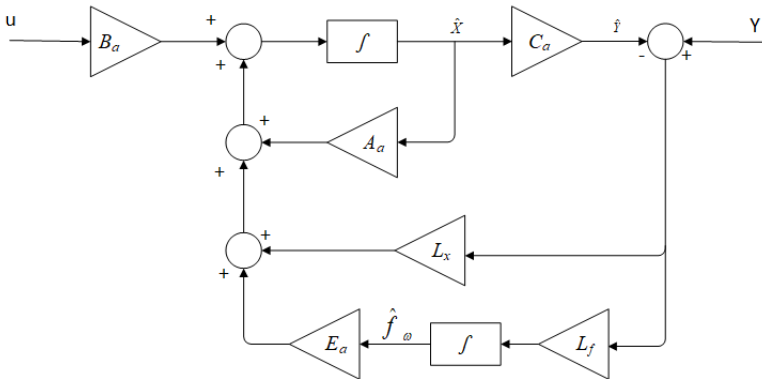
Dan  $\tilde{x}$  memiliki dinamika yang direpresentasikan oleh persamaan berikut:

$$\dot{\tilde{x}} = \tilde{A}\tilde{x} + \tilde{B}u \quad (2.32)$$

Menurut (Indriawati, dkk. 2015) *Observer* pada persamaan (2.26) - (2.28) dapat dibangun asal dengan syarat kondisi berikut:

- a.  $R_1 \text{ Rank } (C) \geq r+q$
- b.  $R_2 \text{ Rank } (C, F_a) \geq r$
- c.  $R_3 \text{ Rank } (\tilde{A}_a, \tilde{C}_s)$  adalah *observerable*

Untuk  $r$  dan  $q$  masing- masing adalah akumulasi pangkat matriks  $A$  dan  $C$ , sedangkan  $\tilde{A}_a$  dan  $\tilde{C}_s$  adalah pelebaran matriks  $A$  dan  $C$ .



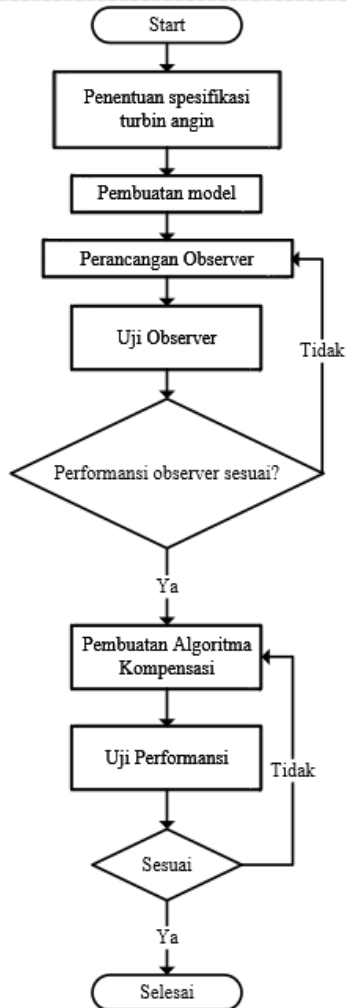
**Gambar 2. 9** Struktur Extended State Observer  
(Indriawati, dkk. 2015)

Gain observer ditentukan dengan merode *pole placement* menggunakan persamaan (2.34). Formula yang dipakai untuk mendapatkan nilai *gain* dari *observer* L adalah formula Auckerman.



### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Tahapan yang dilakukan dalam Tugas Akhir ini ditampilkan dengan sebuah diagram alir (*flowchart*) pada Gambar 3.1



**Gambar 3. 1** Diagram alir simulasi wind turbine

### 3.1 Penentuan Spesifikasi Turbin Angin

Langkah awal dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah studi spesifikasi turbin angin. Studi spesifikasi turbin angin digunakan untuk simulasi pada program Matlab. Parameter yang digunakan mengacu pada (Nicholas, dkk. 2003) seperti yang ditampilkan pada table berikut:

**Tabel 3. 1** Spesifikasi turbin angin (*J. F. Manwell & J. G .McGowan, 2009*)

Model	WT 400
Rotor diameter (m)	2.56
Swept area (m <sup>2</sup> )	5.15
Rated wind speed (m/s)	11
Rated Output (watt)	400
Maximum design wind speed (pu/rad)	80.27
Blade material	Polypropylene
Battery system voltages (volt)	12, 24 or 48

### 3.2 Pembuatan Model Turbin Angin

Tahap kedua setelah dilakukan studi spesifikasi turbin angin adalah pembuatan model turbin angin. Pembuatan model turbin angin dilakukan setelah didapatkan bentuk plant yang mengacu pada (Nicholas, dkk. 2003). Pemodelan ini bertujuan agar model yang dibuat dapat mempresentasikan plant yang akan disimulasikan pada perangkat lunak Matlab 2013a, dengan cara merubah sedikit model turbin angin yang sudah ada pada laporan (Nicholas, dkk. 2003). Pemodelan mengacu pada persamaan (2.2) untuk daya aerodinamis turbin angin, (2.4) untuk torsi aerodinamis turbin angin, (2.8) untuk rotor, (2.11) untuk generator, (2.12) untuk koefisien daya.

Untuk mendefinisikan nilai  $C_p$  yang bervariasi dari  $C_1$  sampai dengan  $C_8$  pada persamaan (2.12), maka digunakan nilai yang telah didapatkan pada (Nicholas, dkk. 2003) adalah sebagai berikut:

$$C_1 = 0.645$$

$$C_2 = 116$$

$$\begin{aligned}
C_3 &= 0.4 \\
C_4 &= 5 \\
C_5 &= 21 \\
C_6 &= 0.00912 \\
C_7 &= 0.08 \\
C_8 &= 0.035
\end{aligned}$$

Prinsip operasi sistem turbin angin adalah mengubah energi angin menjadi energi mekanik yang pada nantinya digunakan untuk menghasilkan listrik. Sistem ini dicirikan oleh perilaku aerodinamis nonlinear dan bergantung pada tenaga angin stokastik yang berubah-ubah sebagai sinyal penggerak. Model sistem turbin angin terdiri dari beberapa subsistem penyusun, seperti yang telah dijelaskan Bab 2.

Pada tugas akhir ini, model sistem turbin angin yang digunakan adalah dalam satuan per unit (pu). Nilai satuan p.u adalah nilai yang terkait dengan jumlah dasar. Dalam analisis sistem tenaga, nilai satuan p.u umum digunakan untuk menganalisis dan mengkomunikasikan nilai voltase, arus, daya dan impedansi. Jumlah satuan pu ini dinormalisasi atau diskalakan pada basis yang dipilih, seperti yang ditunjukkan pada persamaan (3.1) yang memungkinkan para insinyur menyederhanakan perhitungan sistem tenaga dengan beberapa transformasi tegangan. Model *drive train* mencakup percepatan rotor  $\dot{\omega}_r$  dan *torsion angle*  $\dot{\theta}_\Delta$ . Persamaan  $\dot{\theta}_\Delta$  ditunjukkan pada persamaan (3.2).

$$\text{Nilai per unit} = \frac{\text{Nilai sebenarnya (actual quality)}}{\text{Nilai dasar nominal (base quality)}} \quad (3.1)$$

$$\dot{\theta}_\Delta = \omega_r - \omega_g \quad (3.2)$$

Persamaan rotor dan generator mengacu pada (2.8) dan (2.11). Dengan menggunakan model satuan p.u maka persamaan (2.8) didefinisikan menjadi:

$$\dot{\omega}_r = \frac{T_a - T_m}{2H_{WT}} \quad (3.3)$$

Dengan:

$H_{WT}$  : Konstanta inersia *wind turbine* (s)

Torsi mekanik rotor,  $T_m$  selanjutnya dapat dimodelkan sebagai berikut:

$$T_m = \theta_{\Delta} K_{SH} + (\omega_r - \omega_g) D_{mutual} \quad (3.4)$$

Dengan:

$K_{sh}$  = Konstanta pegas pada rotor

$D_{mutual}$  = Konstanta redaman pada motor

Persamaan (3.4) disubsitusikan kedalam persamaan (3.3), sehingga diperoleh persamaan (3.5) berikut:

$$\dot{\omega}_r = \frac{T_a}{2H_{WT}} - \frac{D_{mutual}(\omega_r - \omega_g)}{2H_{WT}} - \frac{\theta_{\Delta} K_{SH}}{2H_{WT}} \quad (3.5)$$

Pemodelan terhadap pengendalian sudut *pitch* oleh motor, persamaannya ditunjukkan sebagai berikut:

$$\ddot{\beta} = -2\xi\omega_n\dot{\beta} + \omega_n^2\beta + \omega_n^2\beta_r \quad (3.6)$$

Dengan:

$\xi$  = Faktor redaman

$\omega_n$  = Frekuensi natural

$\beta_r$  = Sudut *pitch* refresensi

Tahap berikutnya yaitu memodelkan aktuator yang akan digunakan. Aktuator berupa *converter*. Generator dimodelkan

hanya berupa model mekanik, maka diasumsikan *converter* memiliki *controller* internal sehingga *converter* membebani generator dengan torsi tertentu. Sehingga model yang disederhanakan dari *converter* dapat didekati dengan sistem orde satu, persamaannya yaitu:

$$\dot{T}_g = -\frac{1}{\tau_g} T_g + \frac{1}{\tau_g} T_{gref} \quad (3.7)$$

Dengan:

$T_{gref}$  = Torsi generator referensi

$\tau_g$  = Time konstan

Dari persamaan - persamaan yang telah didapatkan, disusun model sistem dalam bentuk persamaan matrik sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_g \\ \dot{\beta} \\ \ddot{\beta} \\ \dot{\omega}_r \\ \dot{\omega}_g \\ \dot{\theta}_\Delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_g} \\ \dot{\beta} \\ -2\xi\omega_n\dot{\beta} + \omega_n^2\beta \\ \frac{T_a}{2H_{WT}} - \frac{D_{mutual}(\omega_t - \omega_g)}{2H_{WT}} - \frac{\theta_\Delta \cdot K_{sh}}{2H_{WT}} \\ \frac{T_m - T_g - (F \cdot \omega_g)}{2H_{WT}} \\ \omega_t - \omega_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\tau_g} T_{gref} \\ 0 \\ \omega_n^2 \beta_{ref} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Persamaan (3.8) mengandung komponen non linier yang berasal dari persamaan  $T_a$  (2.4), yaitu komponen  $\dot{\omega}_r$  (3.5).

### 3.3 Perancangan State Space Observer

Persamaan (3.8) merupakan persamaan nonlinier yang harus dirubah menjadi persamaan linear. Perubahan persamaan menjadi linear bertujuan agar dapat merancang *observer*. *Observer* dirancang untuk mengestimasi sebuah kesalahan, dengan cara mengembangkan persamaan ruang keadaan sistem. Persamaan tersebut diperoleh dari penelitian yang telah dilakukan (Indriawati, dkk, 2015), dengan satu kesalahan berupa kesalahan aktuator yang ditunjukkan pada persamaan (2.16).

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + F_a f_a(t) \quad (3.9)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (3.10)$$

Persamaan linier dari (3.5), yaitu sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_r = & \frac{1}{2H_{WT}} \frac{\partial T_a}{\partial \beta} \beta - \left( \frac{D_{mutual}}{2H_{WT}} + \frac{1}{2H_{WT}} \frac{\partial T_a}{\partial \omega_r} \right) \omega_r + \\ & \frac{F_g}{n_g / 2H_{WT}} \omega_g + \frac{K_{sh}}{2H_{WT}} \theta_{\Delta} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Perubahan *torque aerodynamic* terhadap perubahan kecepatan angin. Penurunannya ditunjukkan sebagai berikut:

$$\frac{\partial T_a}{\partial V_W} = \frac{1}{2} \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^2}{\omega} \left\{ V_W^3 \frac{\partial C_p}{\partial V_W} + 3C_p V_W^2 \right\}$$

$$\frac{\partial T_a}{\partial V_W} = \frac{1}{2} \frac{\rho A}{\omega} V_W^3 \frac{\partial C_p}{\partial V_W} + \frac{3}{2} \frac{\rho A}{\omega} C_p V_W^2$$

$$\frac{\partial T_a}{\partial V_W} = \frac{1}{2\omega_r} \rho A V_W^3 \frac{\partial C_p}{\partial V_W} + \frac{3}{2\omega} \rho A V_W^2 C_p$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial T_a}{\partial V_W} &= -K_2 V_W^3 \frac{\omega R}{V_W^2} \frac{\partial C_p}{\partial \lambda} + 3K_2 V_W^2 C_p \\ \frac{\partial T_a}{\partial V_W} &= -K_1 K_2 V_W \omega \frac{\partial C_p}{\partial \lambda} + 3K_2 V_W^2 C_p\end{aligned}\quad (3.12)$$

$$\frac{\partial C_p}{\partial V_W} = \frac{\partial C_p}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial V_W} = -\frac{\partial C_p}{\partial \lambda} \frac{\omega R}{V_W^2} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial C_p}{\partial \left(\frac{1}{\lambda_i}\right)} &= C_1 \cdot C_2 \cdot e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} - C_5 \cdot C_1 \left[ -C_4 - C_3 \cdot (2,5 + \beta) + \frac{C_2}{\lambda_i} \right] \cdot e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} \\ &\quad (3.14)\end{aligned}$$

$$\frac{\partial C_p}{\partial \lambda} = \frac{\partial C_p}{\partial \left(\frac{1}{\lambda_i}\right)} + C_1 \cdot C_6 \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial C_p}{\partial \lambda} &= C_1 \cdot C_6 + C_1 \cdot C_2 \cdot e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} - C_5 \cdot C_1 \left[ -C_4 - C_3 \cdot (2,5 + \beta) + \frac{C_2}{\lambda_i} \right] \cdot e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} \\ &\quad (3.16)\end{aligned}$$

Selanjutnya ditentukan sebuah persamaan perubahan *torque aerodynamic* terhadap kecepatan rotor pada turbin angin. Penurunan persamaan adalah sebagai berikut:

$$\frac{\partial T_a}{\partial \omega_r} = \frac{K_2 K_1}{\omega} \cdot V_{\omega}^2 \cdot \frac{\partial C_p}{\partial \lambda} - \frac{K_2}{\omega} \cdot V_{\omega}^3 \cdot C_p \quad (3.17)$$

Selanjutnya ditentukan sebuah persamaan perubahan *torque aerodynamic* terhadap *pitch angle*. Persamaan ditunjukkan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_a}{\partial \beta} &= \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot A}{\omega} \cdot V_W^3 \cdot \frac{\partial C_p}{\partial \beta} \\ \frac{\partial T_a}{\partial \beta} &= K_2 \cdot V_W^3 \cdot \frac{\partial C_p}{\partial \beta} \end{aligned} \quad (3.18)$$

Dengan:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_p}{\partial \beta} &= C_1 \cdot \left( -C_3 + C_2 \cdot \frac{\partial \left( \frac{1}{\lambda_i} \right)}{\partial \beta} \right) \cdot e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} \\ &\quad - C_1 \cdot C_5 \cdot \left( -C_4 - C_3(2,5 + \beta) + \frac{C_2}{\lambda_i} \cdot e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} \right) \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial \left( \frac{1}{\lambda_i} \right)}{\partial \beta} = -\frac{C_7}{[\lambda + C_7 \cdot (2,5 + \beta)]^2} + \frac{C_8 \cdot [3 \cdot (2,5 + \beta)^2]}{[1 + (2,5 + \beta)^3]^2} \quad (3.20)$$

Selanjutnya persamaan (3.8) dapat dituliskan kembali bentuk liniernya menjadi:



$$\begin{bmatrix} \dot{T}_g \\ \dot{\beta} \\ \dot{\omega}_r \\ \dot{\omega}_g \\ \dot{\theta}_\Delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_g} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_n^2 & -2\xi\omega_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2H_{WT}} \cdot \frac{\partial T_a}{\partial \beta} & 0 & -\frac{D_{mutual}}{2H_{WT}} + \frac{1}{2H_{WT}} \cdot \frac{\partial T_a}{\partial \omega_r} & \frac{F_g}{n_g/2H_{WT}} & \frac{K_{sh}}{2H_{WT}} \\ -\frac{1}{2H_{WT}} & 0 & 0 & \frac{-F}{n_g/2H_{WT}} & -\frac{D_{mutual}}{n_g^2/2H_{WT}} & \frac{K_{sh}}{n_g \cdot 2H_{WT}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -\frac{1}{n_g} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_g \\ \beta \\ \omega_r \\ \omega_g \\ \theta_\Delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\tau_g} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_n^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{H_{WT}(\partial T_a / \partial V_W)} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{gref} \\ \beta_{ref} \\ V_W \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Atau dinyatakan dalam *state space*:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.22)$$

Dengan:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_g} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_n^2 & -2\xi\omega_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2H_{WT}} \frac{\partial T_a}{\partial \beta} & 0 & -\frac{D_{mutual}}{2H_{WT}} + \frac{1}{2H_{WT}} \frac{\partial T_a}{\partial \omega_r} & \frac{F_g}{n_g/2H_{WT}} & \frac{K_{sh}}{2H_{WT}} \\ -\frac{1}{2H_{WT}} & 0 & 0 & \frac{-F}{n_g/2H_{WT}} & -\frac{D_{mutual}}{n_g^2/2H_{WT}} & \frac{K_{sh}}{n_g \cdot 2H_{WT}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -\frac{1}{n_g} & 0 \end{bmatrix}$$

$$x = \begin{bmatrix} T_g \\ \beta \\ \beta \\ \omega_r \\ \omega_g \\ \theta_\Delta \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\tau_g} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_n^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{H_{WT}(\partial T_a / \partial V_W)} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; u = \begin{bmatrix} T_{gref} \\ \beta_{ref} \\ V_W \end{bmatrix}$$

Output yang diukur adalah  $T_g$  dan  $\omega_r$  sehingga:

$$y = \begin{bmatrix} T_g \\ \omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0; 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_g \\ \beta \\ \beta \\ \omega_r \\ \omega_g \\ \theta_\Delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{gref} \\ \beta_{ref} \\ V_W \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Atau dinyatakan dalam bentuk persamaan output *state space* sebagai berikut:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0; 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Kemudian didefinisikan variable keadaan baru  $z(t)$  yang memiliki dinamika seperti persamaan (2.20) dan (2.21). Selanjutnya dari persamaan-persamaan yang telah dimodelkan, dilakukan perancangan *state space observer* yang mengacu pada persamaan (2.26) sampai (2.28). Struktur observer yang digunakan

ditunjukkan pada Gambar 2.9. Dengan demikian diperoleh parameter sebagai berikut:

$$A_a = \begin{bmatrix} -10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.878 & 0.1736 & -9.2905 & 0 & 0 \\ -0.7299 & 0 & 0 & 1.0949 & -1.1022 & 58.5912 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$B_a = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2.0480 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; E_a = \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_a = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Untuk langkah selanjutnya yaitu menentukan *gain observer* menggunakan persamaan (2.31) dengan metode *pole-placement*. Pole yang diinginkan adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} p1 &= -79210.9135846187 + 242370.315966750i; \\ p2 &= -79210.9135846187 - 242370.315966750i; \\ p3 &= -6.73292715574182; \\ p4 &= -2.75357957126034; \\ p5 &= -1.64580599895583; \\ p6 &= -0.551070661383115 + 7.63463265792990i; \\ p7 &= -0.551070661383115 - 7.63463265792990i; \\ p8 &= -1.00000033793060; \\ p9 &= -0.999999662069517; \end{aligned}$$

Sehingga diperoleh matriks L:

$$L = \begin{bmatrix} 3.32 & 0.62 & -0.62 & 7.12 & 4.11 & 3.79 & -2.05 & 3.78 & -2.29 \\ 2.88 & 5.35 & -5.35 & 7.02 & 3.69 & 3.74 & -1.78 & 3.67 & -1.99 \end{bmatrix}$$

Dengan:

$$L_x = \begin{bmatrix} 3.32 & 0.61 & -0.61 & 7.12 & 4.11 & 3.79 & -2.05 & 3.78 \\ 2.88 & 5.35 & -5.35 & 7.01 & 3.69 & 3.73 & -1.78 & 3.66 \end{bmatrix}$$

$$L_f = \begin{bmatrix} -2.29 \\ -1.99 \end{bmatrix}$$

### 3.4 Pembuatan Algoritma Kompensasi

Pembuatan algoritma kompensasi berfungsi untuk mengakomodasi kesalahan yang terjadi pada aktuator. Dengan mengatur ulang sistem menggunakan metode kompensasi, kesalahan yang terjadi pada aktuator dapat diperbaiki secara otomatis sehingga sistem dapat beroperasi sesuai *setpoint*.

Untuk kesalahan aktuator, kompensasi menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$u_m = u - \hat{f}_a \quad (3.24)$$

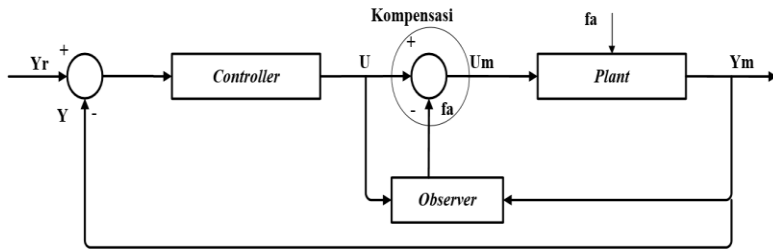
Dengan:

$u_m$  = nilai sinyal kendali yang mengandung kesalahan

$u$  = nilai kendali sinyal sebenarnya

$\hat{f}_a$  = estimasi kesalahan aktuator

Berdasarkan persamaan (3.24) perancangan skema blok simulasi reconfigurable control dapat dilihat pada Gambar 3.2.



**Gambar 3. 2** Mekanisme Kompensasi

### 3.5 Pengujian Sistem FTC

Pengujian dilakukan dengan mensimulasikan model yang merepresentasikan plant pada pembahasan sebelumnya. Dengan parameter ditunjukkan pada Tabel 3.2.

**Tabel 3. 2** Parameter Model Plant

Parameter	Definisi	Nilai	Satuan
$\beta_{\min} - \beta_{\max}$	Sudu <i>pitch</i> minimum dan maksimum	0-27	Deg
$\beta/s$	Laju <i>pitch</i>	10	Deg/s
$C_{p_{\max}}$	Koefisien daya maksimal	0,5	-
$\lambda_{\max}$	<i>tip speed ratio</i> maksimal	9,95	-
$V_w$	Kecepatan angin	3-14	m/s
$K_{SH}$	Koefisien kekakuan	80,27	Pu/rad
$T_0$	Torsi awal turbin	0,83	Pu
$\omega_{\min} - \omega_{\max}$	Kecepatan rotor minimum dan maksimum	0,5-1,2	Pu
H	Konstanta inersia generator	0,685	Pu
F	Faktor gesekan generator	0,1	Pu
$H_{all}$	Seluruh inersia konstan	4,32	Pu
$D_{mutual}$	Beban gesekan	1,5	Pu

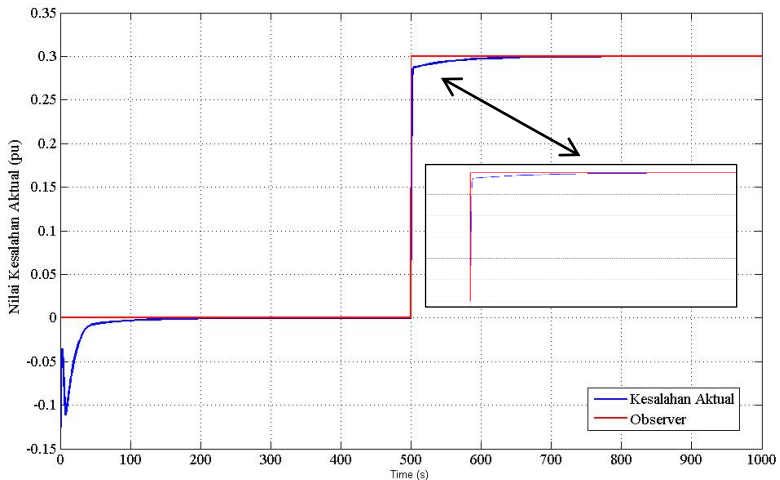
Sistem beroperasi pada satu kondisi kecepatan angin, yaitu 11 m.s<sup>-1</sup>. Pengujian dilakukan dengan diberi kesalahan bias pada

sistem, yaitu 0,3 pu, 0,6 pu, 0,9 pu, dan 1,2 pu. Respon yang ditampilkan adalah respon kecepatan, respon keluaran daya dan hasil estimasi kesalahan aktuator. Kriteria performansi pada sistem, yaitu *maximum undershoot dan settling time*.

## BAB IV ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Uji Observer

Pada tahap ini merupakan tahap lanjutan setelah perancangan *observer*. Uji *observer* ini dilakukan dengan tujuan untuk membuktikan bahwa *observer* yang rancang sudah dapat mempresentasikan *plant* yang telah dimodelkan dalam mengestimasi kesalahan. Berikut hasil dari uji *observer*.



**Gambar 4.1** Hasil Uji *Observer*

Hasil uji *observer* dinyatakan dengan membandingkan kesalahan aktual dengan hasil *observer* ( $\hat{f}$ ) yang ditunjukkan pada Gambar 4.1, garis berwarna biru menggambarkan hasil dari kesalahan aktual. Dan garis yang berwarna merah menggambarkan hasil estimasi *observer*. Dapat dilihat pada Gambar 4.1 bahwa garis merah yang mengikuti garis biru. Hal tersebut menunjukkan bahwa *observer* telah mampu mengatasi kesalahan yang sudah disimulasikan dalam waktu 500-650 detik. Jika tahap ini telah

sesuai, maka masuk ke tahap selanjutnya yaitu uji performansi dari hasil pembuatan algoritma kompensasi.

## 4.2 Uji Performansi

Setelah melakukan pembuatan algoritma kompensasi dengan persamaan (3.24), maka selanjutnya dilakukan uji performansi untuk menguji algoritma *fault tolerant control* yang telah dibuat. Uji performansi ini dilakukan dengan cara simulasi pada perangkat lunak Matlab 2013a. Kesalahan pada aktuator disimulasikan berupa kesalahan bias. Kesalahan bias merupakan penyimpangan nilai dari nilai tetapan yang telah ditentukan. Kesalahan bias secara simulasi yang diberikan pada aktuator sebesar 0,3 pu, 0,6 pu, 0,9 pu dan 1,2 pu. Kesalahan bias pada aktuator dapat berupa gangguan yang menghambat berputarnya kecepatan torsi generator pada blok *speed and pitch control* melalui tegangan pada konverter sebagai variabel kontrolnya.

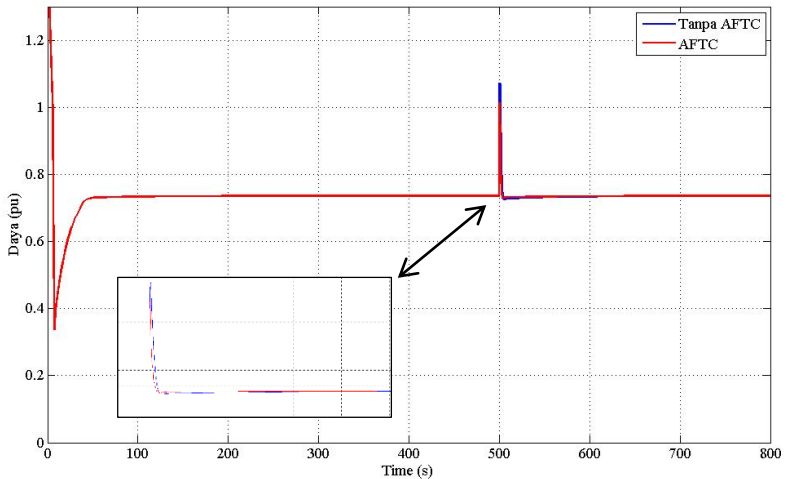
### 4.2.1. Uji Kesalahan Bias 0.3 pu

Respon sistem hasil simulasi FTC dengan kesalahan bias sebesar 0,3 pu pada aktuator pada Gambar 4.2. Terlihat bahwa saat terjadi kesalahan pada waktu ke 500 detik bahwa terdapat perbedaan keluaran daya sebelum dan sesudah dikompensasi. Pada garis berwarna biru dan merah terdapat *maximum overshoot* pada waktu ke 500 detik, akan tetapi garis merah mempunyai *maximum overshoot* lebih kecil dari garis biru yang menunjukkan bahwa FTC mampu mengestimasi kesalahan. Sehingga FTC mampu menjaga keluaran daya secara optimum.

Pada Gambar 4.3 garis berwarna hijau menunjukkan *setpoint* berupa kecepatan turbin ( $W_{ref}$ ), sedangkan garis berwarna biru dan merah sebagai yang dikendalikan berupa kecepatan generator ( $W_g$ ) sebagai hasil uji bias pada saat sebelum dan sesudah dikompensasi oleh FTC. Terlihat pada garis berwarna biru dan merah terdapat *maximum undershoot* sebesar 4,12% dan 2,5%, pada warna biru menunjukkan bahwa kesalahan bias masih bisa diakomodasi oleh sistem sehingga dapat kembali ke *setpoint* yang diinginkan tanpa FTC dengan perbedaan *settling time*. Perbedaan yang didapatkan



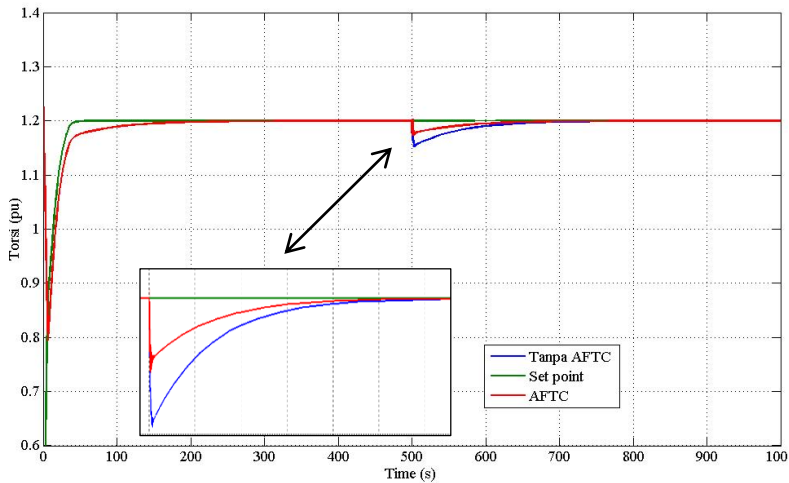
pada *settling time* sebesar 768 detik oleh garis merah dan 787 detik oleh garis biru. Hal ini menunjukkan bahwa FTC mampu mengakomodasi kesalahan yang ditunjukkan dengan perbedaan *maximum undershoot* sebesar 1,62% dan perbedaan *settling time* sebesar 19 detik seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.1.



**Gambar 4. 2** Nilai keluaran daya sebelum dan sesudah dikompensasi dengan kesalahan bias 0.3 pu

**Tabel 4. 1** Performansi sistem dengan kesalahan bias 0.3 pu pada aktuator

Parameter	Dengan FTC	Tanpa FTC
<i>Maximum Undershoot</i>	2.5%	4.12%
<i>Settling Time</i>	768 detik	787 detik



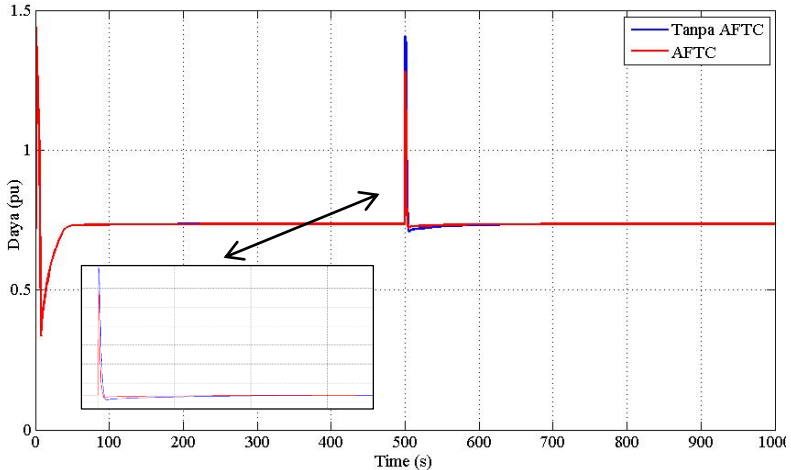
**Gambar 4. 3** Nilai uji bias 0.3 pu sebelum sesudah dikompensasi

#### 4.2.2. Uji Kesalahan Bias 0.6 pu

Respon sistem hasil simulasi FTC dengan kesalahan bias sebesar 0,6 pu pada aktuator pada Gambar 4.4. Terlihat bahwa saat terjadi kesalahan pada waktu ke 500 detik bahwa terdapat perbedaan keluaran daya sebelum dan sesudah dikompensasi. Pada garis berwarna biru dan merah terdapat *maximum overshoot* pada waktu ke 500 detik, akan tetapi garis merah mempunyai *maximum overshoot* lebih kecil dari garis biru yang menunjukkan bahwa FTC mampu mengestimasi kesalahan. Sehingga FTC mampu menjaga keluaran daya secara optimum.

Pada Gambar 4.5 garis berwarna hijau menunjukkan *setpoint* berupa kecepatan turbin ( $W_{ref}$ ), sedangkan garis berwarna biru dan merah sebagai yang dikendalikan berupa kecepatan generator ( $W_g$ ) sebagai hasil uji bias pada saat sebelum dan sesudah dikompensasi oleh FTC. Terlihat pada garis berwarna biru dan merah terdapat *maximum undershoot* sebesar 8,3% dan 4,2%, pada warna biru menunjukkan bahwa kesalahan bias masih bisa diakomodasi oleh sistem sehingga dapat kembali ke *setpoint* yang diinginkan tanpa FTC dengan perbedaan *settling time*. Perbedaan yang didapatkan pada *settling time* sebesar 875 detik oleh garis merah dan 729 detik

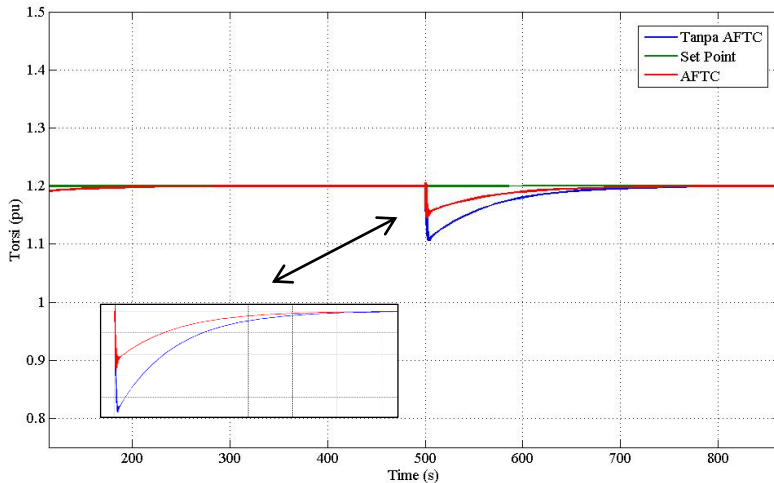
oleh garis biru. Hal ini menunjukkan bahwa FTC mampu mengakomodasi kesalahan yang ditunjukkan dengan perbedaan *maximum undershoot* sebesar 4.1% dan perbedaan *settling time* sebesar 146 detik seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.2.



**Gambar 4. 4** Nilai keluaran daya sebelum dan sesudah dikompensasi dengan kesalahan bias 0.6 pu

**Tabel 4. 2** Performansi sistem dengan kesalahan bias 0.6 pu pada aktuator

Parameter	Dengan FTC	Tanpa FTC
<i>MaximumUndershoot</i>	4.2%	8.3%
<i>Settling Time</i>	729 detik	875 detik



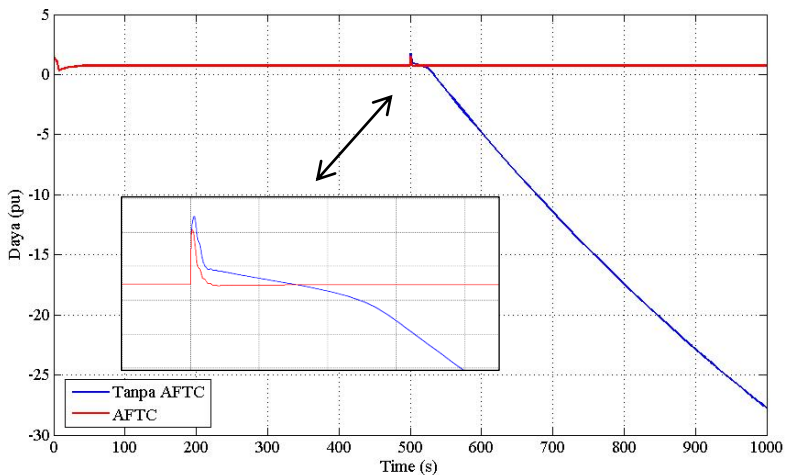
**Gambar 4. 5** Nilai uji bias 0.6 pu sebelum dan sesudah dikompensasi

#### 4.2.3. Uji Kesalahan Bias 0.9 pu

Respon sistem hasil simulasi FTC dengan kesalahan bias sebesar 0,9 pu pada aktuator pada Gambar 4.6. Terlihat bahwa saat terjadi kesalahan pada waktu ke 500 detik bahwa terdapat perbedaan keluaran daya sebelum dan sesudah dikompensasi. Pada garis berwarna biru dan merah terdapat *maximum overshoot* pada waktu ke 500 detik, akan tetapi garis merah mempunyai *maximum overshoot* lebih kecil dari garis biru yang menunjukkan bahwa FTC mampu mengestimasi kesalahan. Sehingga FTC mampu menjaga keluaran daya secara optimum. Sedangkan pada garis biru menunjukkan keluaran daya yang semakin menurun terhadap besarnya kesalahan yang terjadi.

Pada Gambar 4.7 garis berwarna hijau menunjukkan *setpoint* berupa kecepatan turbin ( $W_{ref}$ ), sedangkan garis berwarna biru dan merah sebagai yang dikendalikan berupa kecepatan generator ( $W_g$ ) sebagai hasil uji bias pada saat sebelum dan sesudah dikompensasi oleh FTC. Terlihat pada garis berwarna biru dan merah terdapat *maximum undershoot* sebesar 100% dan 7,5%, pada warna biru menunjukkan bahwa kesalahan bias tidak bisa diakomodasi oleh

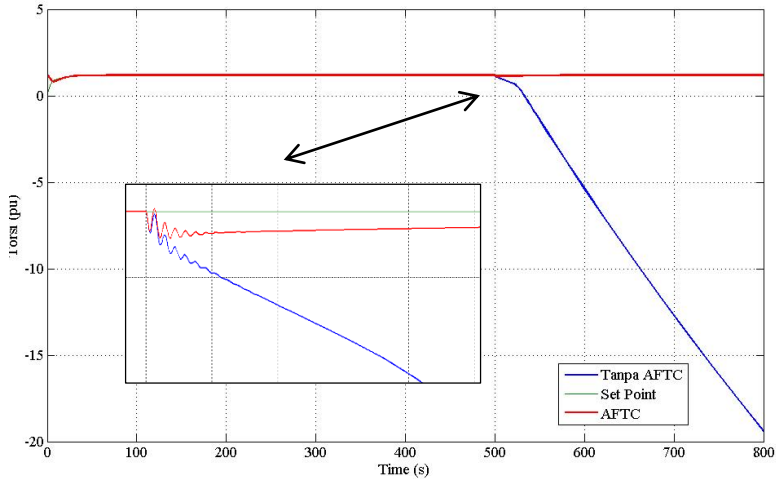
sistem sehingga tidak kembali ke *setpoint* yang diinginkan tanpa FTC dengan perbedaan *settling time*. Perbedaan yang didapatkan pada *settling time* sebesar 1500 detik (sesuai dengan batasan waktu uji yang diberikan) oleh garis merah dan 756 detik oleh garis biru. Hal ini menunjukkan bahwa FTC mampu mengakomodasi kesalahan yang ditunjukkan dengan perbedaan *maximum undershoot* sebesar 92,5% dan perbedaan *settling time* sebesar 744 detik seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.3.



**Gambar 4. 6** Nilai keluaran daya sebelum dan sesudah dikompensasi dengan kesalahan bias 0.9 pu

**Tabel 4. 3** Performansi sistem dengan kesalahan bias 0.9 pu pada aktuatur

Parameter	Dengan FTC	Tanpa FTC
<i>Maximum Undershoot</i>	7.5%	100%
<i>Settling Time</i>	756 detik	1500 detik



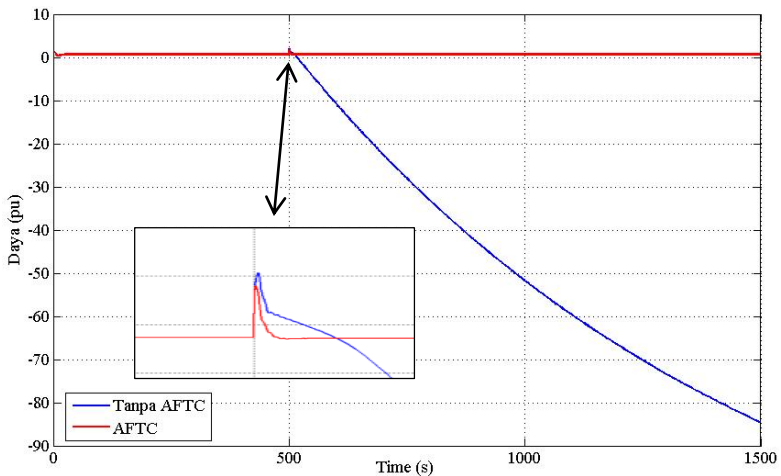
**Gambar 4. 7** Nilai uji bias 0.9 pu sebelum dan sesudah dikompensasi

#### 4.2.4. Uji Kesalahan Bias 1.2 pu

Respon sistem hasil simulasi FTC dengan kesalahan bias sebesar 1,2 pu pada aktuatur pada Gambar 4.8. Terlihat bahwa saat terjadi kesalahan pada waktu ke 500 detik bahwa terdapat perbedaan keluaran daya sebelum dan sesudah dikompensasi. Pada garis berwarna biru dan merah terdapat *maximum overshoot* pada waktu ke 500 detik, akan tetapi garis merah mempunyai *maximum overshoot* lebih kecil dari garis biru yang menunjukkan bahwa FTC mampu mengestimasi kesalahan. Sehingga FTC mampu menjaga keluaran daya secara optimum. Sedangkan pada garis biru menunjukkan keluaran daya yang semakin menurun terhadap besarnya kesalahan yang terjadi.

Pada Gambar 4.9 garis berwarna hijau menunjukkan *setpoint* berupa kecepatan turbin ( $W_{ref}$ ), sedangkan garis berwarna biru dan merah sebagai yang dikendalikan berupa kecepatan generator ( $W_g$ ) sebagai hasil uji bias pada saat sebelum dan sesudah dikompensasi oleh FTC. Terlihat pada garis berwarna biru dan merah terdapat *maximum undershoot* sebesar 100% dan 10,8%, pada warna biru menunjukkan bahwa kesalahan bias tidak bisa diakomodasi oleh

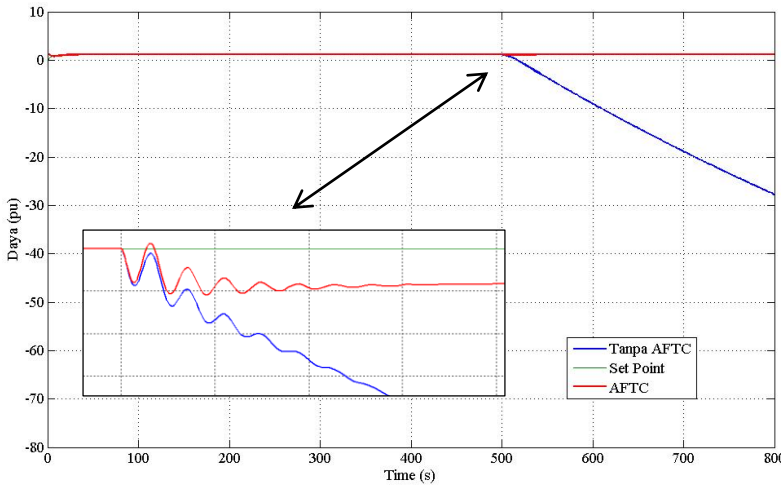
sistem sehingga tidak kembali ke *setpoint* yang diinginkan tanpa FTC dengan perbedaan *settling time*. Perbedaan yang didapatkan pada *settling time* sebesar 1500 detik (sesuai dengan batasan waktu uji yang diberikan) oleh garis merah dan 785 detik oleh garis biru. Hal ini menunjukkan bahwa FTC mampu mengakomodasi kesalahan yang ditunjukkan dengan perbedaan *maximum undershoot* sebesar 89,2% dan perbedaan *settling time* sebesar 715 detik seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.4.



**Gambar 4. 8** Nilai keluaran daya sebelum dan sesudah dikompensasi dengan kesalahan bias 1.2 pu

**Tabel 4. 4** Performansi sistem dengan kesalahan bias 1.2 pu pada aktuator

Parameter	Dengan FTC	Tanpa FTC
<i>Maximum Undershoot</i>	10.8%	100%
<i>Settling Time</i>	785 detik	1500 detik



**Gambar 4. 9** Nilai uji bias 1.2 pu sebelum dikompensasi



## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan dari tugas akhir mengenai perancangan sistem *Fault Tolerant Control* pada turbin angin dengan kesalahan pada aktuatur adalah sebagai berikut:

- Telah dilakukan perancangan sistem FTC pada turbin angin dengan kesalahan pada aktuatur secara simulasi. Sehingga sistem mampu memperbaiki kesalahan minor berupa kesalahan bias.
- *Observer* mampu menghasilkan estimasi kesalahan yang mirip dengan kesalahan aktual. *Observer* yang dirancang mampu mengestimasi kesalahan bias secara benar dalam waktu 500-650 detik.
- Pada kesalahan bias 0,3 pu, 0,6 pu, 0,9 pu dan 1,2 pu memiliki nilai *maximum undershoot* tanpa FTC sebesar 4,12%, 8,3%, 100% dan 100%. Sedangkan untuk nilai *maximum undershoot* dengan FTC sebesar 2,5%, 4,2%, 7,5% dan 10,8%. Untuk nilai *settling time* tanpa FTC sebesar 787 detik, 875 detik, 1500 detik dan 1500 detik. Sedangkan nilai *settling time* dengan FTC sebesar 768 detik, 729 detik, 756 detik dan 785 detik.
- Semakin besar kesalahannya maka daya yang dihasilkan oleh sistem tanpa FTC semakin menurun. Semakin besar kesalahan maka semakin besar *maximum undershoot* yang dihasilkan. Sedangkan sistem dengan FTC menghasilkan *maximum undershoot* tidak sebesar tanpa FTC.
- Dari hasil simulasi diperoleh bahwa kesalahan bias maksimum yang masih bisa diakomodasi oleh sistem tanpa FTC adalah 0,7 pu, sedangkan sistem dengan FTC mampu mengakomodasi kesalahan bias hingga 1,2 pu meskipun terjadi *maximum undershoot* sebesar 10,8%.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR PUSTAKA

- Amarto, F. B. (2017). Perancangan *Active Fault Tolerant Control (AFTC)* pada Plant Evaporator Efek Vakum PT Polychem Indonesia dengan Kesalahan Sensor dan Aktuator. Surabaya.
- Basilio, J. C. (2002). *Design of PI and PID Controlers With Transient Performance Specification. IEEE Transactions On Education, Vol. 45, No.4.*
- Burak Ozpineci, L. M. (TN 37996-2100). *Cycloconverters*. Knoxville,USA.
- Eko. (2017). Perancangan Sistem Kontrol Sudut Pitch Berbasis Pi-Logika Fuzzy Pada Turbin Angin Skala Kecil. Surabaya.
- Ghazie, A. (2017). Perancangan Sistem *Fault Tolerant Fuzzy Control* Pada Turbin Angin Dengan Kesalahan Pada Sensor.Surabaya.
- Hasyim Asy'ari, d. (2012). Desain *Prototipe* Pembangkit Listrik Tenaga Angin Dengan Turbin Horizontal Dan Generator Magnet Permanen Tipe Axial Kecepatan Rendah. ISSN: 1979-911X.
- J. F. Manwell & J. G .McGowan. (2009). *Wind Energy Explained*. Washington. USA.
- Katherin Indriawati, dkk. (2015). *Robust Fuzzy Observer-Based Fault Tolerant Tracking Control for Nonlinear Systems with Simultaneous Actuator and Sensor Faults: Application to a DC Series Motor Speed Drive*. Surabaya.
- Katherin Indriawati, dkk. (2017). Desain Dan Pengembangan Prototipe Turbin Angin Berbasis *Supervisory Control*: Studi Kasus Implementasi Di Ladang Angin Indonesia. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Kresna, Viqi. B. (2017). Perancangan Sistem Active Fault Tolerant Control Pada Pengendalian Kecepatan Sistem Servo Modular Ms150 Dc Dengan Kesalahan Pada Aktuator Dan Sensor. Surabaya.
- Maulana, N. (2012). Penerapan *Robust* PID Pada Pengendalian Kecepatan MS 150 DC Motor Servo System. Institut

Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya

Musyafa', A. (2016). Turbin Angin & Sistem Kontrol. Pt Revka Petra Media. Surabaya.

Miller, Nicholas. 2003. Dynamic Modelling of GE 1.5 and 3.6 Wind Turbine Generators. USA: General Electric International, Inc.

Ogata, K. (1987). *Discrete-Time Control Systems*. USA: Prentice-Hall, Inc.

Ogata, K. (1997). *Modern Control Engineering*. Tom Robbins.

Putro, E. M. (2017). Perancangan Sistem Kontrol Sudut Pitch. Surabaya.

Resmi, C. (2010). Studi Eksperimental Sistem Pembangkit Listrik Pada *Vertical Axix Wind Turbine (VAWT)* Skala Kecil. Surabaya.

Shaker, M. S. (2012). *Active Fault-Tolerant Control of nonlinear system with Wind Turbine Application*. Baghdad.

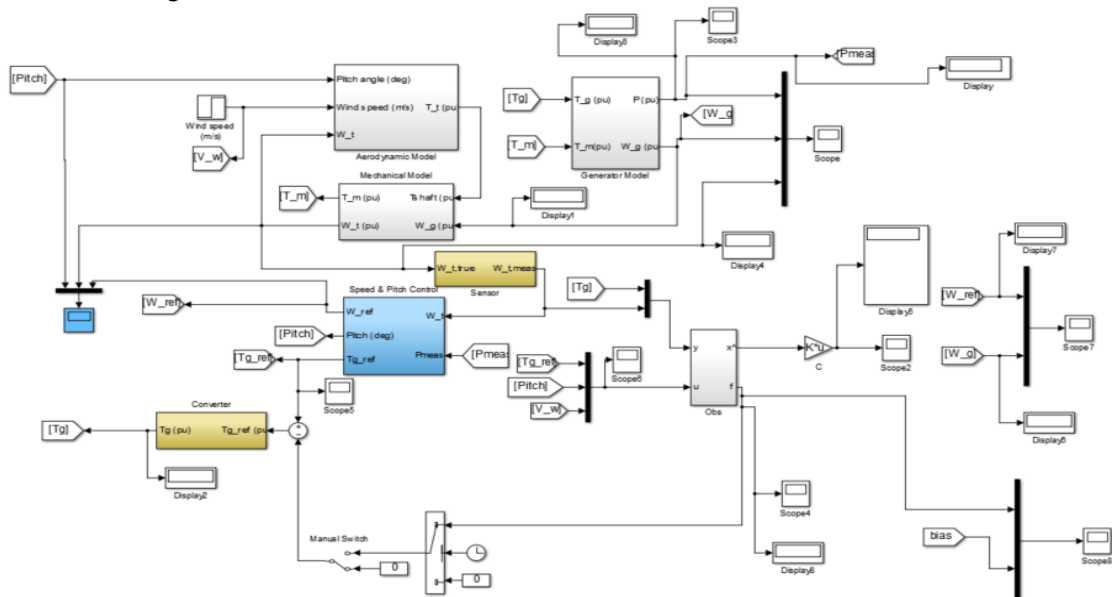
Sutrisna, K. F. (2008). *Cycloconverter : AC-AC Konverter* Penurun Frekuensi. Bandung.

Wu, B. (2006). *High power Converters and AC Drives*. IEEE Press. New York

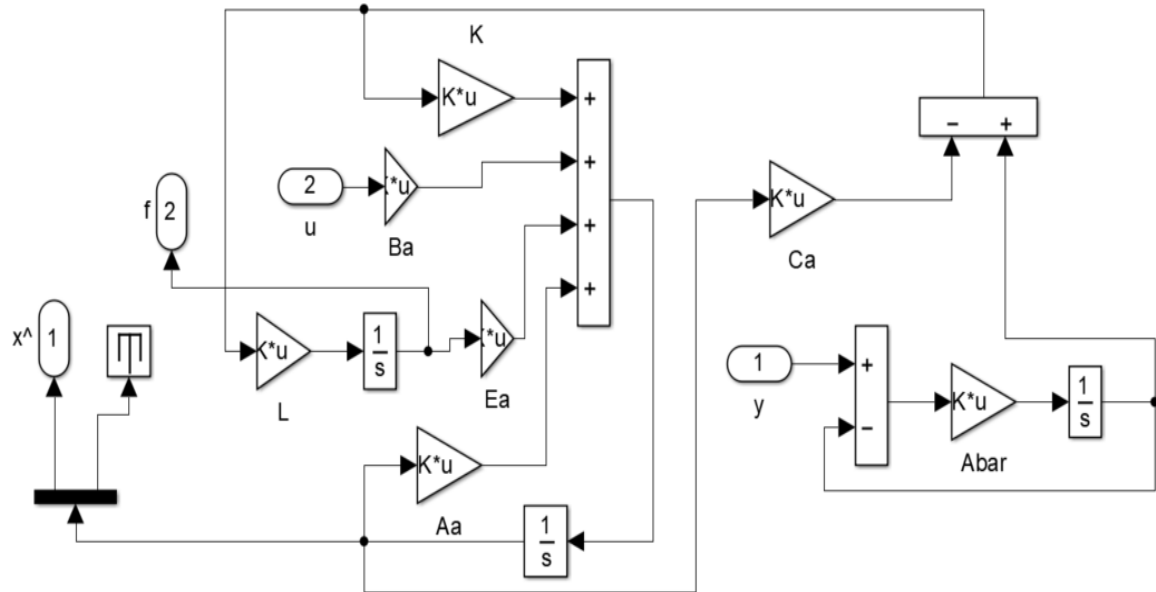
Youmin Zhang & Jin Jiang. (2005). *Bibliographical Review on Reconfigurable Fault Tolerant Control system*. Canada.

**LAMPIRAN A**  
***SUBSYSTEM SIMULINK MATLAB 2013a***

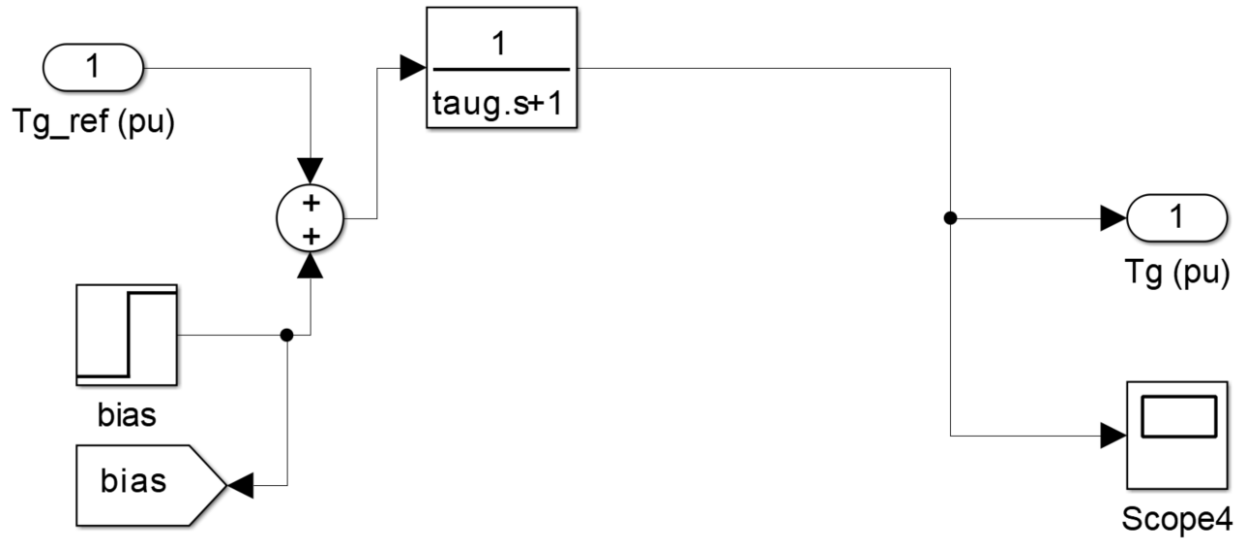
a. Plant Turbin Angin



b. *Observer*



c. *Fault Actuator*



[illegible]



```

rated_omegar=1.2;
omegar = rated_omegar;

% Enforce boundaries on wind speed
% A warning could be displayed
if wind_speed_CpMax < 6
    wind_speed_CpMax=6;
    disp('Warning: Wind speed at nominal
speed and at Cp max has been set to 6 m/s')
end
if wind_speed_CpMax > 30
    wind_speed_CpMax=30;
    disp('Warning: Wind speed at nominal
speed and at Cp max has been set to 30 m/s')
end

K1=lambda_CpMax/omegar*wind_speed_CpMax;

% Calculation of K2 needed to get P
equal to the requested value at
% Cp max for the requested wind speed

Prated=Pmec1*1;
P_rated_omegar_theta_zero=0.75;

K2 =
P_rated_omegar_theta_zero*Prated/(wind_speed_CpM
ax^3*CpMax);

K1_K2=[K1 K2];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% End of calculation for operation at Cp
max

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Drive train data
```

```
H_WT = 4.32; % (s)
```

```
Ksh = 80.27; % (pu of nominal mechanical  
torque/rad)
```

```
F_WT = 0; %DC bus capacitor
```

```
D_mutual = 1.5; % (pu of nominal mechanical  
torque/pu dw)
```

```
w_wt0 = 1.2; % (pu of nominal speed)
```

```
torque0 = 0.83; % (pu of nominal mechanical  
torque)
```

```
% Reference rotor speed (wref) data
```

```
Speed_max=1.2; % (pu)
```

```
Speed_min=0.5; % (pu)
```

```
T_speed = 5; %s
```

```
% Speed regulator data
```

```
Kp_speed = 3;
```

```
Ki_speed = 0.1;
```

```
Max_speed_reg=1; %Maximum output value for PI  
speed regulator (pu)
```

```
% Pitch control data
```

```
Kp_pitch = 0.1;
```

```
Ki_pitch = 0.5;
```

```
pitch_max = 27; % (deg)
```

```
pitch_rate = 10; % (deg/s)
```

```
Pitch_time_constant=0.01; % (s)
```

```
wn = 1;
```

```
zeta = 1;
```

```
% Pitch compensation data
```

```
Kp_compensation = 3;
```

```
Ki_compensation = 30;
```

```

% Generator data
H = 0.685; % Inertia constant (s)
F = 0.01; % Friction factor (pu)
wmo = 1.2; % (pu of nominal speed)
init = -0.2;
taug = 0.1;
ng = 1;

pitch = 0;
beta0 = -0.9;
R = K1;
dTadB = 0;
seperlamdai = 1/(lambda_CpMax + c7*(beta0 +
pitch)) - c8/(1 + (beta0 + pitch)^3);
dCpdlamda = c1*c6 + c1*c2*exp(-c5*seperlamdai) -
c5*c1*(-c4 - c3*(beta0+pitch) +
c2*seperlamdai)*exp(-c5*seperlamdai);
dTadwr = K2*R*wind_speed_CpMax^2*dCpdlamda -
K2/w_wt0*wind_speed_CpMax^3*CpMax;
dTadVw = -R*K2*w_wt0*wind_speed_CpMax*dCpdlamda
+ 3*K2*wind_speed_CpMax^2*CpMax;

A = [-1/taug 0 0 0 0 0;
      0 0 1 0 0 0;
      0 -wn^2 -2*zeta*wn 0 0 0;
      0 1/(2*H_WT)*dTadB 0 -
      (D_mutual)/(2*H_WT)+1/(2*H_WT)*dTadwr
      D_mutual/(2*H_WT) -Ksh/(2*H_WT);
      -1/(2*H) 0 0 D_mutual/(2*H) -
      (D_mutual)/ng^2/(2*H)-F/ng/(2*H) Ksh/ng/(2*H);
      0 0 0 1 -1/ng 0];
B = [1/taug 0 0;
      0 0 0;
      0 wn^2 0;
      0 0 1/(2*H_WT)*dTadVw;
      0 0 0;
      0 0 0];

```

```
C = [1 0 0 0 0 0; 0 0 0 1 0 0];  
D = [0 0 0];
```

```
n = length(A);  
p = size(C,1);  
m = size(B,2);
```

```
Dd = [0 0 0 1 0 0]'*-0.01;  
Fa = B(:,1);
```

```
dd = size(Dd,2);  
fa = size(Fa,2);
```

```
Abar = 1*eye(p);  
Aa = [A zeros(n,p); Abar*C -Abar];  
Ba = [B; zeros(p,m)];  
Ea = [Fa ; zeros(p,fa)];  
Da = [Dd ; zeros(p,dd)];  
Ca = [zeros(p,n) eye(p)];  
Bo = [Da zeros(n+p,fa); zeros(fa,dd) eye(fa)];  
Atild = [Aa Ea; zeros(fa,n+p) zeros(fa)];  
Ctild = [Ca zeros(p,fa)];
```

```
p1 = -79210.9135846187 + 242370.315966750i;  
p2 = -79210.9135846187 - 242370.315966750i;  
p3 = -6.73292715574182;  
p4 = -2.75357957126034;  
p5 = -1.64580599895583;  
p6 = -0.551070661383115 + 7.63463265792990i;  
p7 = -0.551070661383115 - 7.63463265792990i;  
p8 = -1.00000033793060;  
p9 = -0.999999662069517;
```

```
Ktild = place(Atild',Ctild',1*[p1 p2 p3 p4 p5 p6  
p7 p8 p9]);  
K = Ktild(:,1:n+p);  
L = Ktild(:,n+p+1:n+p+fa);
```

## BIODATA PENULIS



Nama penulis Alif Helmi Aghnia. Penulis dilahirkan di Surabaya, tanggal 15 Oktober 1994 dari ayah adalah Heru Susetyo, SE dan ibu adalah Yuniarsih Fatimah, SE. Saat ini penulis tinggal di Jalan Gubeng Kertajaya 3F No.2. Penulis telah menyelesaikan pendidikan tingkat dasar di SD Negeri Larangan Sdj pada tahun 2007, pendidikan menengah pertama di SMPN 2 Candi pada tahun 2010, pendidikan menengah atas di SMA Negeri 2 Sidoarjo pada tahun 2013, dan sedang menempuh pendidikan S1 Teknik Fisika FTI di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya hingga sekarang.

Pada bulan Maret 2018 penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **Perancangan Sistem *Fault Tolerant Control* Pada Turbin Angin Dengan Kesalahan Pada Aktuator**. Bagi pembaca yang memiliki saran, kritik, atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini maka dapat menghubungi penulis melalui [alifhelmiaghnia13@gmail.com](mailto:alifhelmiaghnia13@gmail.com)